

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektrotechniky



# VLIV ELEKTRICKÉ VOZBY NA NAPÁJECÍ SOUSTAVU

Doktorská disertační práce

Autor: **Ing. Petr Mičulka**  
Školitel: **prof. Ing. Josef Paleček, CSc.**  
Studijní program: **P2649 Elektrotechnika**  
Studijní obor: **3907V001 Elektroenergetika**

**Ostrava 2011**

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto doktorskou disertační práci vypracoval samostatně a že jsem veškeré použité prameny a publikace uvedl v seznamu použité literatury. Zároveň považuji za svou milou povinnost poděkovat svému školiteli, prof. Ing. Josefu Palečkovi, CSc., za cenné připomínky a podněty, které vedly k vypracování této práce.

Práce vznikla při řešení mezinárodního projektu *KONTAKT: Analýza vlivů elektrické vozby na napájecí energetickou soustavu*, řešeného VŠB-TU Ostrava a RGUPS Rostov na Donu.

V Ostravě

.....  
Ing. Petr Mičulka

## Anotace

Práce, která se vám dostává do rukou, analyzuje a experimentálně ověřuje zpětný vliv hnacích vozidel střídavé trakční proudové soustavy na soustavu nadřazenou, tj. distribuční síť 110 kV. Sledovanými zpětnými vlivy trakční napájecí soustavy působícími na soustavu nadřazenou jsou napěťová nesymetrie, zapříčiněná způsobem připojení trakční napájecí stanice (TNS) k distribuční síti a generování harmonických trakčním hnacím vozidlem do napájecího systému, jejich šíření do distribuční sítě a případné následné ovlivňování ostatních odběratelů elektrické energie.

Všechny části rozvodných energetických systémů jsou v podstatě kmitočtově závislé elektrické obvody, navržené na síťový kmitočet (v ČR 50 Hz). V době budování těchto systémů se navíc předpokládal lineární charakter připojené zátěže a tudíž harmonický průběh odebíraného proudu. S postupným rozvojem polovodičových měničů a s tím, jak dochází k jejich stále širšímu využívání, pozbývá předpoklad lineární zátěže čím dál více platnost, neboť činností těchto měničů dochází k deformaci tvaru křivky odebíraného proudu. Ten se potom skládá ze základní harmonické a vyšších harmonických složek, jejichž následkem vznikají na impedanci v rozvodném systému napěťové úbytky, které se v podobě kmitočtového spektra přenášejí k dalším odběratelům elektrické energie. Tam mohou nepříznivě ovlivňovat elektronické systémy (např. ovládací nebo sdělovací systémy), nebo způsobovat nadměrné zahřívání točivých elektrických strojů (a s tím spojené ztráty), kondenzátorů, dielektrika kabelů apod.

Střídavá elektrická trakce současně patří mezi největší jednofázové odběry v distribuční síti. Trakční transformátory 110/27 kV, instalované v trakčních transformovnách, mívají jmenovitý výkon okolo 12 MVA. Lokomotivy pro střídavou trakci, nejčastěji používané v ČR, mají výkon okolo 3,5 MW. Provoz takto velké jednofázové zátěže způsobuje zvýšené hodnoty napěťové nesymetrie. Jelikož odběr proudu elektrické lokomotivy mívá velmi dynamický charakter, je nezbytné monitorovat, zda se hodnoty koeficientu napěťové nesymetrie pohybují v limitech stanovených příslušnými normami.

První část práce popisuje měřicí aplikaci, která byla vytvořena za účelem měření okamžitých hodnot elektrických veličin a sběru dat. Jádrem měřicího stanoviště tvoří přenosný počítač doplněný o měřicí kartu s měřicími převodníky. Softwarová část měřicí aplikace je vytvořena na bázi virtuální instrumentace (programovací jazyk G).

Další stěžejní částí disertační práce je část experimentální. V rámci této části bylo provedeno měření v podmínkách reálného provozu, a to na primární a sekundární straně trakčního transformátoru a v nadřazené rozvodně distribuční síti. Měření probíhalo v obou měřicích stanovištích současně a jeho účelem bylo monitorování úrovně napěťové nesymetrie a harmonického zkreslení v jednotlivých uzlech přenosové cesty. Součástí této části je analýza měřených dat, vyhodnocení koeficientu napěťové nesymetrie a harmonického zkreslení. Vyhodnocená data získaná měřením v trakční transformovně a jí nadřazené rozvodně jsou prezentována jak v tabulkové, tak v grafické podobě.

V poslední části práce se zabývám počítačovou simulací přenosu výše zmíněných zpětných vlivů střídavé elektrické trakce z trakční napájecí soustavy po vedení 110 kV do nadřazené distribuční sítě. Výsledky simulace jsou dány do srovnání s daty získanými měřeními v trakční transformovně ve Velešíně a jí nadřazené rozvodně 110 kV vodní elektrárny Lipno.

Předkládaná práce je koncipována jako doktorská disertační práce VŠB-TU Ostrava a výsledků v ní uvedených může být využito jak pracovníky Správy železniční dopravní cesty, s.o., tak rozvodnou společností zajišťující dodávku elektrické energie pro napájení elektrické trakce.

## **Klíčová slova**

Elektrická trakce, trakční napájecí soustava, koeficient napět'ové nesymetrie, koeficient celkového harmonického zkreslení (THD), trakční transformovna, virtuální instrumentace, filtračně kompenzační zařízení, metoda souměrných složek



## Annotation

Submitted work analyzes and experimentally verifies the reverse effect of AC traction locomotives to the superior system, i.e. 110 kV distribution network. Monitored reverse effects that influence the superior power supply system are voltage unbalance (caused by the method of connecting the traction power supply station to the distribution network) and generation of harmonics by the traction driving vehicle into the traction power supply system as well as spreading of the harmonics to the distribution network and possible subsequent influence on other consumers of electricity.

All parts of the energy distribution systems are essentially frequency-dependent electrical circuits designed for power frequency (50 Hz in the Czech Republic). During the construction of these systems linear nature of the connected load was also assumed as well as the harmonic loaded current. But the use of semiconductor converters is still wider with the gradual development of it. This fact makes the assumption of the linear load increasingly losing validity, because activities of these drives deform the shape of the curve drawn by the current. Then the current is composed of the fundamental harmonic and higher harmonics. This results in voltage drops across impedance of the distribution system that are transmitted in the form of frequency spectrum to other customers. There the harmonics may adversely affect the electronic systems (e.g. control or communication systems), or cause an excessive overheating (and associated losses) of rotating electrical machines, capacitors, cables dielectric, etc.

AC electric traction is one of the largest single-phase loads in the distribution network. Traction transformers 110/27 kV installed in traction power supply station have a rated power of about 12 MVA. The most commonly used traction locomotives in Czech Republic have rated power of about 3,5 MW. Therefore the operation of such a large single-phase load increases the voltage unbalance. It is necessary to monitor whether the voltage unbalance coefficient is in the range limits set by the relevant standards because the current consumption of electric locomotives tends to have a very dynamic character.

The first part of this work describes the measuring application that was designed to measure instantaneous values of electrical parameters and the data collection of measured values. The core of the measuring station consists of a portable PC with a USB based DAQ (data acquisition) together with measuring transducers. Software of the measuring application is created based on virtual instrumentation (G programming language).

Another crucial part of this work is an experimental part. Measurements in real traffic conditions (in the primary and secondary side of the traction transformer substation and in the superior distribution network) have been carried out within this section. I measured in both locations simultaneously and the purpose of the measurement was to monitor the level of voltage unbalance coefficient and harmonic distortion level at each node of transmission path. An analysis of measured data, evaluation of the voltage unbalance coefficient and harmonic distortion evaluation is included

in this part of work. Evaluated data obtained by measuring in the traction transformer substation and its superior substation are presented in both tabular and in graphical form.

In the last part of this work I deal with computer simulation of transmission of the above-mentioned AC electric traction reverse effects from the traction power supply system over the 110 kV line to the superior substation. The simulation results are given in comparison with data obtained by measuring the traction transformer station in Velešín and its superior substation 110 kV (hydroelectric power plant in Lipno).

Submitted work is conceived as a doctoral dissertation and the results therein can be used by staff of the Railway Infrastructure Administration as well as by staff of the utility company providing electricity supply to power electric traction.

## **Key words**

Electric traction, traction supply system, voltage unbalance coefficient, total harmonic distortion coefficient (THD), traction transformer station, virtual instrumentation, filtering-compensatory device, symmetrical components method

## Seznam použitých symbolů a značek

$C_{3F}$	kapacita filtru 3. harmonické (F)
$C_{5F}$	kapacita filtru 5. harmonické (F)
$C_k$	měrná kapacita vedení (F/km)
EMC	elektromagnetická kompatibilita
$f$	frekvence (Hz)
$G_k$	měrná vodivost (S/km)
$h$	řád harmonické ( - )
$I_0$	proud naprázdno (A)
$IQR$	interkvartilové rozpětí
$l$	vzdálenost (m)
$L_{1D}$	indukčnost dekompenzační větve (H)
$L_k$	měrná indukčnost vedení (H)
$L_T$	indukčnost podélné větve náhradního obvodu transformátoru (H)
MTN	měřicí transformátor napětí
MTP	měřicí transformátor proudu
NN	nízké napětí
$p$	počet pulzů usměrňovače ( - )
$p_i$	proudový přenos ( - )
PPDS	Pravidla provozování distribučních soustav
PWM	pulsně-šířková modulace
$R_{3F}$	odpor filtru 3. harmonické ( $\Omega$ )
$R_{5F}$	odpor filtru 5. harmonické ( $\Omega$ )
$R_k$	měrný odpor vedení ( $\Omega$ )
$R_T$	odpor podélné větve náhradního obvodu transformátoru ( $\Omega$ )
$s$	výběrová směrodatná odchylka
$S$	zdánlivý výkon (VA)
$S_{k3}$	třířázový zkratový výkon (VA)
$S_{1f}$	zdánlivý jednofázový výkon (VA)
$S_{TN}$	zdánlivý výkon trakčního transformátoru (VA)
SŽDC	správa železniční a dopavní cesty
$TDF$	celkový činitel zkreslení
$TDR$	celkové zkreslení
$THD$	činitel celkového harmonického zkreslení
$THD_{U12}$	koeficient celkového harmonického zkreslení sdruženého napětí $U_{12}$
$THD_{U23}$	koeficient celkového harmonického zkreslení sdruženého napětí $U_{23}$
$THD_{U31}$	koeficient celkového harmonického zkreslení sdruženého napětí $U_{31}$
$THF$	činitel harmonického zkreslení
TNS	trakční napájecí stanice
TT	trakční transformovna
TVS	transformátor vlastní spotřeby
$U_{12}$	sdružené napětí mezi fází $U_1$ a $U_2$ (V)
$U_{23}$	sdružené napětí mezi fází $U_2$ a $U_3$ (V)
$U_{31}$	sdružené napětí mezi fází $U_3$ a $U_1$ (V)
$u_k$	napětí nakrátko (%)
$U_V$	vztažné napětí (V)
$V$	efektivní hodnota obecné veličiny
$V_1$	efektivní hodnota základní harmonické obecné veličiny
$V_{1N}$	jmenovitá efektivní hodnota základní harmonické
VE	vodní elektrárna
$V_h$	efektivní hodnota obecné veličiny harmonické řádu $h$

VVN	velmi vysoké napětí
$x_{0,25}$	dolní kvartil
$x_{0,5}$	medián
$x_{0,75}$	horní kvartil
$X_M$	změřená hodnota měřené veličiny
$X_S$	skutečná hodnota měřené veličiny
$X_T$	reaktance podélné větve náhradního obvodu transformátoru ( $\Omega$ )
$Z_T$	impedance náhradního obvodu transformátoru ( $\Omega$ )
ZVN	zvláště vysoké napětí
$\alpha$	výběrová šikmost (skewness)
$\beta$	výběrová špičatost (kurtosis)
$\Delta$	absolutní chyba
$\delta$	relativní chyba
$\Delta P_0$	ztráty naprázdno (W)
$\Delta P_k$	ztráty nakrátko (W)
$\Delta_{\text{SYST}}$	systematická chyba
$\rho_i$	koeficient proudové nesymetrie (%)
$\rho_u$	koeficient napěťové nesymetrie (%)
$\varphi$	fázový posun (°)
$\omega$	úhlová rychlost ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )

# Obsah

**Anotace**

**Klíčová slova**

**Annotation**

**Key words**

**Seznam použitých symbolů a značek**

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Přehled o současném stavu problematiky</b>	<b>12</b>
2.1	Stejnoseměrná trakční soustava 3 kV	13
2.2	Střídavá trakční soustava 25 kV, 50 Hz	13
2.3	Trakční transformovny	14
2.4	Vliv střídavé trakční soustavy 25 kV, 50 Hz na napájecí síť z hlediska nesymetrie	16
2.5	Nesymetrie v třífázových soustavách	16
2.5.1	Metoda souměrných složek (Fortescueova teorie)	17
2.5.2	Klasifikace nesymetrie a nevyváženosti	18
2.5.3	Výpočet napětíové nesymetrie ze sdružených hodnot napětí	18
2.5.4	Orientační výpočet napětíové nesymetrie při jednofázovém odběru	19
2.5.5	Předepsané normativní hodnoty koeficientu napětíové nesymetrie	19
2.6	Definice harmonického zkreslení	19
2.6.1	Harmonické v trakčním obvodu 25 kV, 50 Hz	20
2.6.2	Hodnocení harmonických v trakčním obvodu	25
<b>3</b>	<b>Cíle disertační práce</b>	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>Popis měřicího zařízení</b>	<b>27</b>
4.1	Popis měřicího hardware	27
4.1.1	Vstupní převodníky	28
4.2	Popis měřicího software	29
4.2.1	Virtuální měřicí technika	29
4.2.2	Vývojové prostředí LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench)	30
4.2.3	Popis programu určeného k měření v trakční transformovně	32
4.3	Chyby měření	34
4.4	Přesnost měření měřicí aplikace	35

<b>5</b>	<b>Měření v trakční transformovně</b>	<b>37</b>
5.1	Trakční transformovna Velešín	37
5.2	Rozvodna 110 kV vodní elektrárny Lipno	41
5.3	Naměřené hodnoty sledovaných veličin	41
5.3.1	Naměřené hodnoty z trakční transformovny Velešín v roce 2009	42
5.3.2	Vypočítané hodnoty 95-ti proc. percentilů $\rho_U$ a $THD_U$ pro rok 2009	43
5.3.3	Naměřené hodnoty z trakční transformovny Velešín v roce 2010	44
5.3.4	Vypočítané hodnoty 95-ti procentních percentilů $\rho_U$ a $THD_U$ pro rok 2010 (TT Velešín)	46
5.3.5	Naměřené hodnoty z rozvodny 110 kV VE Lipno v roce 2010	46
5.3.6	Vypočítané hodnoty 95-ti procentních percentilů $\rho_U$ a $THD_U$ pro rok 2010 (VE Lipno)	48
5.3.7	Srovnání naměřených hodnot z TT Velešín v letech 2009 a 2010	48
5.4	Srovnání hodnot 95-ti procentních percentilů $\rho_U$ a $THD_U$ (TT Velešín 2009-2010)	50
5.5	Srovnání naměřených hodnot z TT Velešín a VE Lipno v 2010	51
5.6	Srovnání hodnot 95-ti procentních percentilů $\rho_U$ a $THD_U$ pro rok 2010 (TT Velešín a VE Lipno)	53
<b>6</b>	<b>Statistická analýza</b>	<b>55</b>
6.1	Statistické charakteristiky - popisná statistika	55
6.2	Histogramy a krabicové grafy	58
<b>7</b>	<b>Modelování rušivých vlivů vyvolaných střídavou elektrickou trakcí</b>	<b>70</b>
7.1	Modelování napěťové nesymetrie - parametry modelu	70
7.1.1	Výsledky modelování přenosu napěťové nesymetrie po vedení 110 kV	72
7.2	Modelování napěťových harmonických - parametry modelu	74
7.2.1	Výsledky modelování přenosu napěťových harmonických po vedení 110 kV	75
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>78</b>
	<b>Seznam použité literatury</b>	<b>80</b>
	<b>Použité normy</b>	<b>81</b>
	<b>Vlastní publikace</b>	<b>82</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>84</b>

# 1 Úvod

Pojmem elektrická trakce označujeme pohon hnacího vozidla, ať už kolejového nebo nekolejového, elektromotorem. Elektrická trakce může být buď nezávislá (zdroj napájení elektromotoru je uvnitř vozidla), nebo závislá (hnací vozidlo je napájeno z trakčního vedení). Hlavními výhodami závislé trakce jsou zvýšení dopravní výkonnosti (vyšší výkon, vyšší rychlosti), snížení nákladů na přepravu (cena v Kč za přepravenou tunu na kilometr), možnost rekuperace, ekologičnost. Proti závislé trakci naopak mluví vyšší investiční náklady (stavba trakčního vedení a napájecích stanic, zvýšení jízdních profilů) a především závislost na dodávkách elektrické energie. Při elektrifikaci tratě je tedy velmi důležité posoudit výhodnost a návratnost této investice.

Počátky elektrifikace sahají do konce 19. století (první elektrická lokomotiva představena roku 1879). Jako první se začala rozvíjet stejnosměrná trakční soustava. Důvodem byla tehdejší úroveň technických možností (absence vhodných výkonových usměrňovacích prvků, které by bylo možné použít přímo v hnacím vozidle) a výhodnější momentová charakteristika sériových stejnosměrných motorů. Před druhou světovou válkou byl v Německu úspěšně odzkoušen střídavý jednofázový systém napájení trakce a po válce se tento systém rozšířil i do jiných zemí.

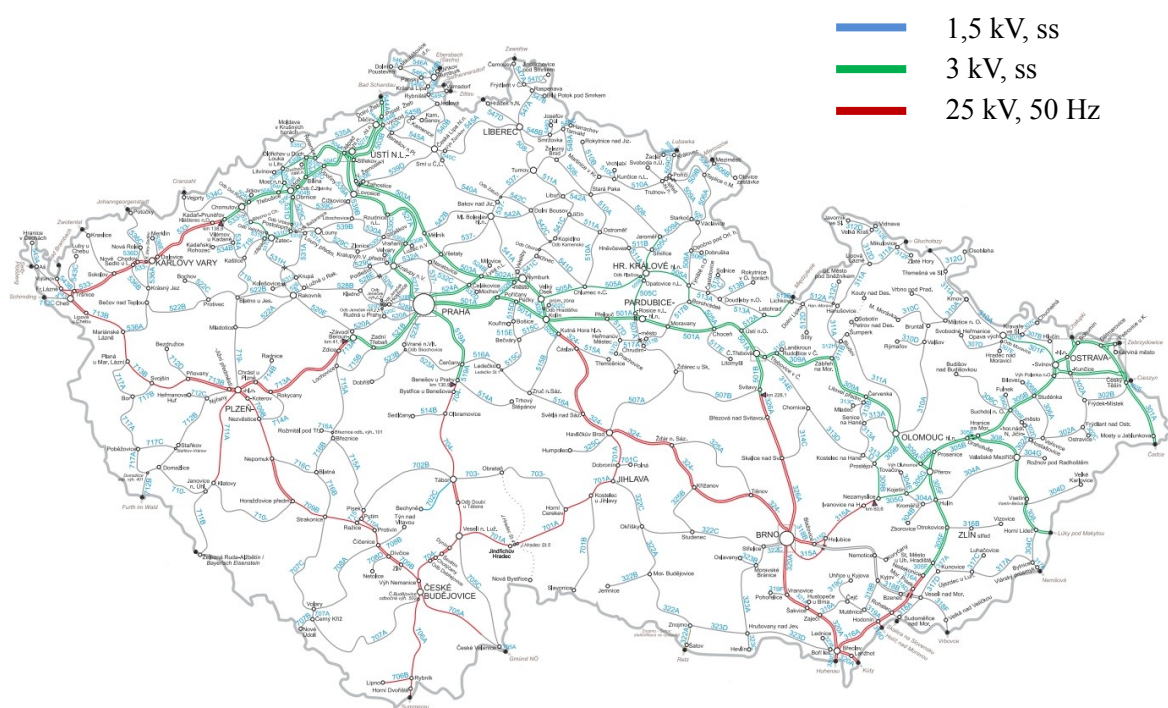
Přes své nesporné výhody má však elektrická trakce i své nevýhody. U stejnosměrného systému je to např. problém bludných proudů a u střídavé trakce především otázka harmonického rušení a napět'ové nesymetrie. V České republice se v současnosti používá jak stejnosměrný (severní část republiky), tak střídavý (jižní část republiky) trakční napájecí systém. Celková míra elektrifikace tratí činí přibližně 32 %. S další významnou elektrifikací tratí se do budoucna nepočítá. Nicméně v současnosti probíhá modernizace stávajících tratí a s tím je spojena aplikace nových řešení (např. napájení netrakčních odběrů z trakčního vedení) a také nasazování nových typů hnacích vozidel do provozu. Tyto skutečnosti mohou být zdrojem energetického rušení, které je třeba monitorovat, a v případě jeho výskytu a překročení povolených limitů hledat možnosti jeho omezení.

## 2 Přehled o současném stavu problematiky

Při analýze vlivů provozu elektrizovaných drah na napájecí energetickou soustavu hraje podstatnou roli systém, kterým jsou sledované tratě elektrizovány. Trakční napájecí proudové systémy můžeme rozdělit do tří velkých skupin:

- stejnosměrný trakční napájecí systém,
- střídavý trakční napájecí systém průmyslového kmitočtu 50 (60) Hz,
- střídavý trakční napájecí systém sníženého kmitočtu 16,7 (25) Hz.

V ČR jsou v současnosti používány dva hlavní trakční napájecí systémy. Stejnosměrná soustava 3 kV (1705 km) a střídavá soustava 25 kV, 50 Hz (1307 km). Trakční měnirny pro napájení elektrických drah stejnosměrné soustavy 3 kV jsou napájeny vedeními 22 kV, případně vedeními 110 kV s mezitransformací na 22 kV, zatímco trakční transformovny pro napájení střídavé trakční soustavy 25 kV, 50 Hz jsou napájeny výhradně z vedení 110 kV [1]. Kromě těchto dvou trakčních napájecích soustav je v ČR, coby pozůstatek počátků elektrifikace železnic, používána ještě stejnosměrná soustava 1,5 kV na trase Tábor-Bechyně (26 km). Mapa napájecích soustav používaných v ČR je na Obr. 2.1.



Obr. 2.1 Mapa trakčních proudových soustav používaných v ČR

Otázka vhodné volby trakční napájecí proudové soustavy pro elektrizaci železnic je dosti složitá a souvisí především s rozsahem již provedené elektrizace a se stavem techniky v době zahájení prací. Stávající soustava samozřejmě nutí železniční správu k tomu, aby z důvodů jednotnosti pokračovala v rozvíjení stávajícího systému (SRN, Rakousko). Mohou však převážet jiné vlivy, a tak se v jedné zemi může rozvíjet více systémů (ČR, SR, Rusko, Francie, Itálie, aj.).



## 2.1 Stejnosměrná trakční soustava 3 kV

Stejnosměrná trakční napájecí soustava se na území ČR začala rozvíjet dříve než střídavá soustava. Vycházelo se z toho, co bylo v době počátků elektrifikace tratí výhodnější a technicky realizovatelné. Absence vhodných výkonových usměrňovacích prvků, které by bylo možné použít přímo v hnacím vozidle, a výhodnější momentová charakteristika sériových stejnosměrných motorů vedly k rozvoji stejnosměrné napájecí soustavy. Ve prospěch rozvoje této trakční soustavy přispěly i zkušenosti jiných železničních správ s touto soustavou (Rusko, Polsko atd.). V podmínkách ČD je používána stejnosměrná trakční soustava se jmenovitým napětím 3 kV. Vyšší napětí by představovalo problém především z hlediska maximálního napětí mezi lamelami komutátoru trakčního motoru a také z hlediska maximálního dovoleného napětí na polovodičových prvcích. Jelikož jsou trakční motory konstruovány maximálně na napětí 1500 V, bývají zapojeny dva motory do série. Tato skupina je pak napájena napětím 3 kV. Celková délka tratí elektrifikovaných tímto systémem je v současnosti cca 1705 km. Nevýhodou tohoto napájecího systému je přítomnost bludných proudů, způsobujících elektrochemickou korozi.

## 2.2 Střídavá trakční soustava 25 kV, 50 Hz

Jak již bylo řečeno, střídavá trakční soustava se začala prosazovat později než stejnosměrná. Teprve až rozvoj polovodičové techniky a elektrotechniky vůbec umožnil zvládnutí napájení napětím s průmyslovým kmitočtem 50 Hz.

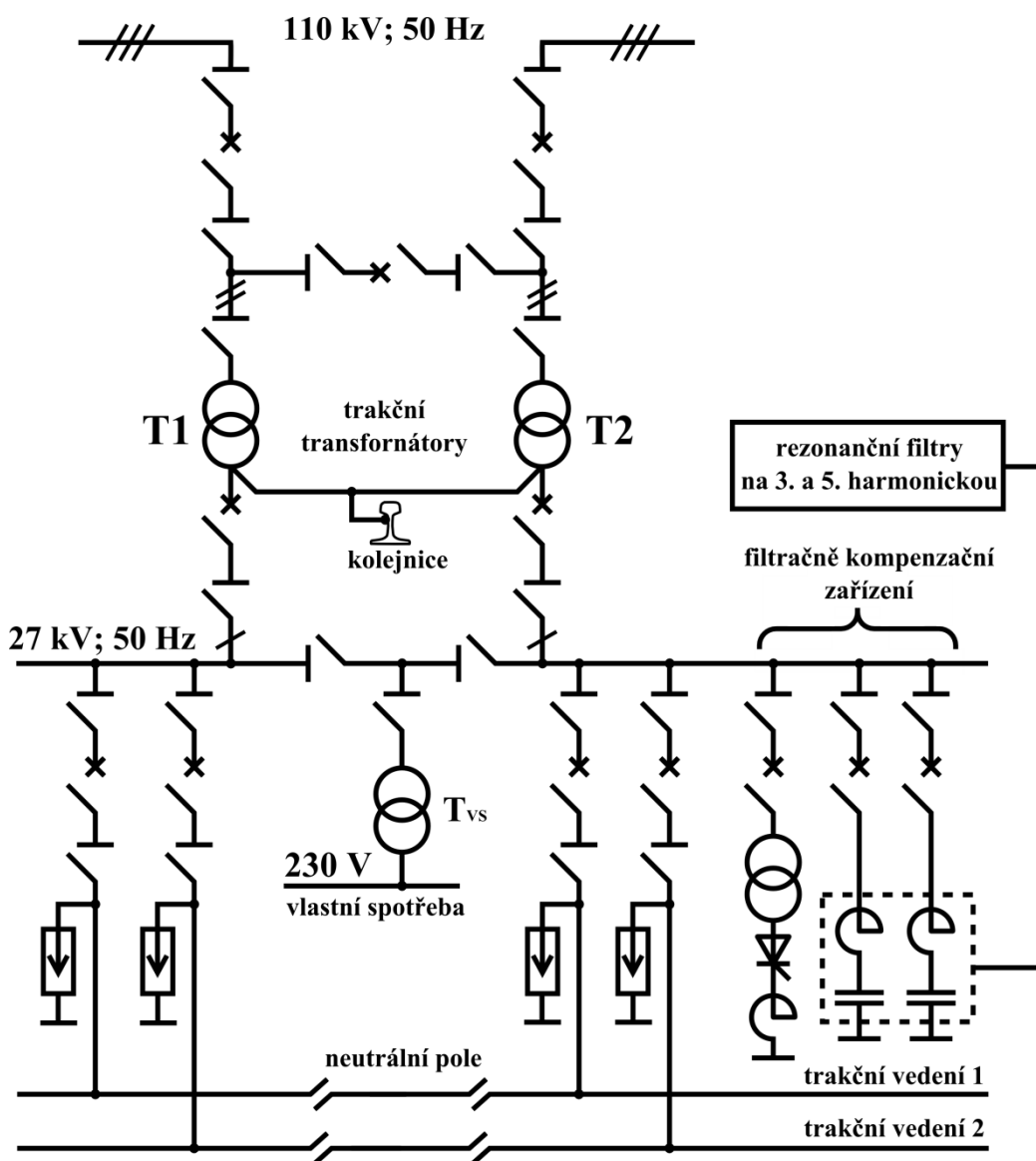
V ČR se používá střídavá trakční soustava 25 kV, 50 Hz. Nejvyšší povolené napětí napěťové soustavy 25 kV na trakčním vedení je 27,5 kV, nejnižší napětí je 19 kV. Krátkodobě je povolen pokles až na 17,5 kV. Větší jmenovité napětí umožňuje použití menších průřezů trakčního vedení a větších vzdáleností mezi trakčními transformovny. Ty se pohybují okolo 40 až 50 km. Jednotlivé napájecí úseky jsou v ČR napájeny zásadně jednostranně. [2]

Trakční motory lokomotiv a motorových vozů napájených napětím 25 kV jsou připojeny přes lokomotivní transformátor a usměrňovač. Lokomotivy první a druhé generace pro střídavou trakci jsou osazeny konstrukčně upravenými sériovými stejnosměrnými motory, tzv. motory na zvlněný proud. Důvodem této úpravy je vlnitý charakter napájecího napětí. Úprava se provádí za účelem omezení oteplení aktivních částí (vinutí a aktivního železa), zlepšení komutace a zvýšení účinnosti. Jednou z výhod střídavé trakce, již bylo především v minulosti využíváno, je možnost řízení napětí trakčních motorů pomocí regulačních transformátorů. V případě stejnosměrné trakce totiž probíhalo řízení napětí trakčních motorů pomocí přepínání motorů do sérioparalelních skupin a pomocí odporů (část lokomotiv, které dosud provozují ČD, používá takové řízení). A právě regulace pomocí regulačního transformátoru je oproti odporové regulaci o mnoho hospodárnější. Tato výhoda ale ztratila na významu s příchodem řízených usměrňovačů a pulzních měničů.

## 2.3 Trakční transformovny

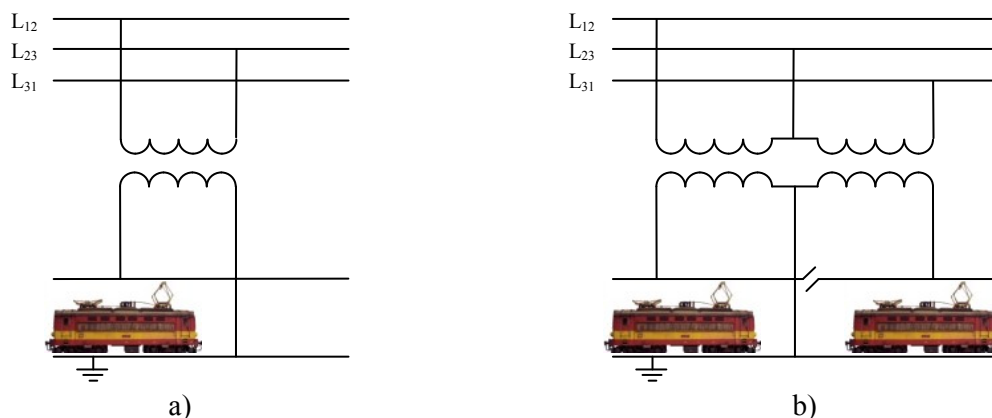
Trakční transformovny jsou stanice pro napájení střídavé trakční soustavy. Energie se zde mění z třífázové na jednofázovou, při zachování frekvence. Jedná se tedy o místo, kde se stýká energetická soustava s trakční soustavou. Zjednodušené schéma trakční transformovny je na Obr. 2.2.

Trakční transformovny pro jednofázovou střídavou trakci jsou v našich podmínkách napájeny výhradně ze sítí VVN 110 kV. Transformovna je nejčastěji napájena dvěma nezávislými vedeními VVN přes vstupní rozvodnu typu „H“. Možné je ale i připojení odbočením z dvojitého vedení.



Obr. 2.2 Zjednodušené obecné schéma trakční transformovny

Za vstupní rozvodnou následuje trakční transformátor. Obvykle bývají v trakční transformovně přítomny dva totožné trakční transformátory, z nichž v provozu je vždy jen jeden a druhý slouží jako záloha. Zapojení, kdy trakční transformovna napájí jen jeden traťový úsek, se označuje jako tzv. „T - připojení“. Trakční transformovna však může napájet každým trakčním transformátorem jeden traťový úsek. V tomto případě je každý z transformátorů připojen k dvěma jiným fázím a toto zapojení se nazývá „V - připojení“. Toto řešení však v našich podmínkách není příliš obvyklé.



Obr. 2.3 Způsoby připojení střídavé trakce  
a) T - připojení b) V - připojení

Dva nejčastěji používané typy trakčních transformátorů jsou uvedeny v Tab. 2.1. Jmenovité primární napětí je 110 kV a jmenovité sekundární napětí je 27 kV. Kvůli relativně častým zkratům na trakčním vedení mají poměrně vysoké napětí nakrátko. Na primární straně mívají přepínatelné odbočky pro regulování kolísajícího napětí. Tyto trakční transformátory musí mít velkou přetížitelnost, 200%  $S_n$  po dobu 2 minut.

Tab. 2.1: Trakční transformátory používané ČD

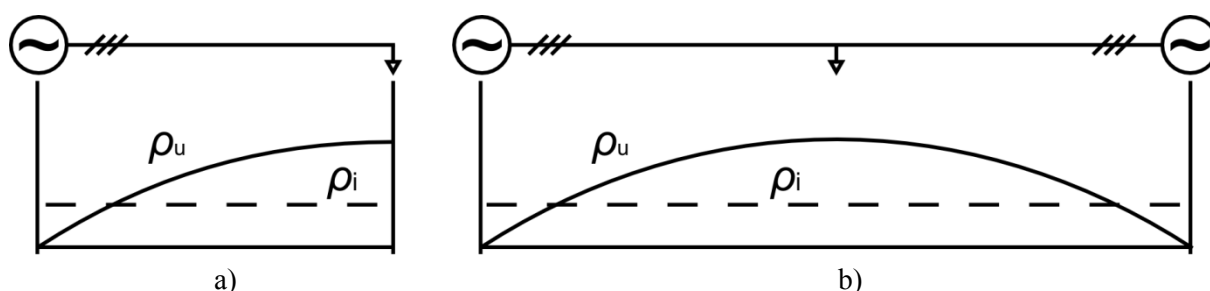
Typ	EJRE 7491/75	EJRH 28 M-O	poznámka
$S_n$ (MVA)	13,3 / 10	12,5 / 10	nucené / přirozené chlazení
převod	110 kV $\pm$ 8 x 2% / 27 kV	110 kV $\pm$ 8 x 2% / 27 kV	
$I_{1n}$ (A)	121 A	113,6 A	
$I_{2n}$ (A)	492 A	463 A	
$u_k$ (%)	12,5 $\pm$ 10 %	12,5 $\pm$ 10 %	
$\Delta P_0$ (kW)	10,9		
$\Delta P_k$ (kW)	104		

Za trakčním transformátorem následuje rozvodna 27 kV, která napájí jednotlivé traťové úseky. K této rozvodně je připojen obvod řízení kompenzace účinníku a obvody filtrace harmonických. Filtrace harmonických je prováděna pomocí dvou LC rezonančních obvodů naladěných na 3. a 5. harmonickou. K řízení kompenzace účinníku se používají fázově řízené tlumivky, což umožňuje reagovat na rychlé změny účinníku. Mimoto rozvodna 27 kV též napájí transformátor vlastní spotřeby a obvody jištění.

## 2.4 Vliv střídavé trakční soustavy 25 kV, 50 Hz na napájecí síť z hlediska nesymetrie

Trakční odběr, jakožto značný jednofázový spotřebič způsobuje v napájecí síti nesymetrii. Obecně, při provozování vícefázové soustavy se snažíme udržovat stejnou velikost fázových veličin a stejný fázový posun mezi jednotlivými fázemi. Pokud však velikost napětí, resp. proudů není stejná, hovoříme o amplitudové nesymetrii. Je-li rozdílný fázový posun mezi jednotlivými fázemi, hovoříme o úhlové nesymetrii. Nastanou-li obě zmiňované alternativy najednou, jedná se o nesymetrii obecnou. Nesymetrie znemožňuje řádný chod spotřebičů, a jejím důsledkem je zvyšování ztrát a tím i tepelného namáhání, a tedy i rychlejší stárnutí elektrotechnických zařízení. Podle toho, je-li součet fázorů různý od nuly nebo roven nule, rozlišujeme dále soustavu nevyváženou nebo vyváženou. [16]

Zdroje elektrické energie v elektrizační soustavě, tj. turboalternátory a hydroalternátory, jsou v zásadě symetrické. Za prakticky symetrické můžeme v praxi také považovat i přenosové cesty (elektrická vedení a transformátory). Nesymetrii tedy vyvolávají spotřebiče, nejčastěji připojením na jednu nebo na dvě fáze. Bezprostředním důsledkem připojení jednofázového resp. dvoufázového spotřebiče k elektrizační soustavě je vznik proudové nesymetrie. Teprve v důsledku průchodu nesymetrických proudů v soustavě vznikají na impedancích soustavy nesymetricky úbytky napětí a tím i napětová nesymetrie.



Obr. 2.4 Průběh proudové a napětové nesymetrie  
a) na vedení s jednostranným napájením b) na vedení s dvojstranným napájením

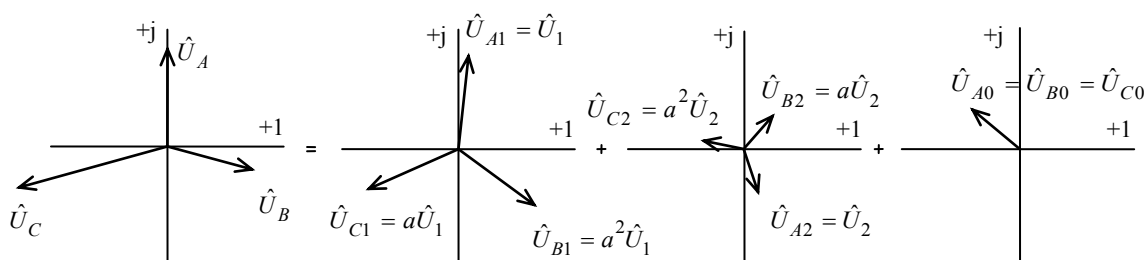
Proudová nesymetrie je po celé délce vedení stejná. Napětová nesymetrie je nejvyšší u spotřebiče a klesá směrem ke zdroji, který je souměrný. Napájíme-li výkonově stejné spotřebiče ze dvou stran, je napětová nesymetrie oproti jednostrannému napájení menší (proudy ve vedení jsou při dvojstranném napájení menší). [2]

## 2.5 Nesymetrie v třífázových soustavách

V energetice se ke klasifikaci nesymetrie užívá výhradně Fortescueova metoda souměrných složek. Dle této metody můžeme  $n$ -fázovou nesouměrnou soustavu rozložit na  $n-1$  souměrných složek vytvářejících točivé magnetické pole a jednou složku netočivou, která vytváří pole pulsující. Netočivá složka však vzniká jen v soustavách s uzemněným uzlem. Se souměrnými složkami provedeme analýzu obvodu a z nalezených výsledků přejdeme zpět k soustavě nesouměrné.

### 2.5.1 Metoda souměrných složek (Fortescueova teorie)

Fortescueova metoda souměrných složek spočívá v nahrazení hvězdice nesymetrických fázorů trojfázové soustavy složením symetrických fázorů soustavy sousledné ( $\hat{U}_{A1}, \hat{U}_{B1}, \hat{U}_{C1}$ ), soustavy zpětné ( $\hat{U}_{A2}, \hat{U}_{B2}, \hat{U}_{C2}$ ) a soustavy netočivé ( $\hat{U}_{A0}, \hat{U}_{B0}, \hat{U}_{C0}$ ), jak je znázorněno na Obr. 2.5. [2] Přičemž, jak již bylo řečeno, netočivá soustava vzniká pouze v sítích s uzemněným uzlem transformátoru (NN, VVN, ZVN).



Obr. 2.5 Náhrada nesymetrických fázorů složkovými fázory

Náhrada fázových napětí složkovými:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_A \\ \hat{U}_B \\ \hat{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \\ \hat{U}_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

kde

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2)$$

$$a^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Pro zpětný přechod od složkových napětí k fázovým:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \\ \hat{U}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{U}_A \\ \hat{U}_B \\ \hat{U}_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

Analogické rovnice platí i pro fázory proudu.

## 2.5.2 Klasifikace nesymetrie a nevyváženosti

Kvalitu přenosu elektrické energie posuzujeme poměrem amplitudy (nebo efektivní hodnoty) zpětné a sousledné složky napětí, resp. proudu (4). Tento poměr se nazývá *součinitel napět'ové*, resp. *proudové nesymetrie*.

Nesouměrnost třífázové soustavy klasifikujeme:

$$\begin{aligned}\rho_u &= \left| \frac{\hat{U}_2}{\hat{U}_1} \right| \cdot 100 (\%) \\ \rho_i &= \left| \frac{\hat{I}_2}{\hat{I}_1} \right| \cdot 100 (\%)\end{aligned}\tag{4}$$

Součinitel proudové nesymetrie nemá při jednofázovém odběru ovšem žádnou vypovídací hodnotu, jelikož je vždy roven 100% bez ohledu na velikost zátěže. Při dvojfázové zátěži je jeho hodnota v rozmezí 50-100%.

Další možností posouzení trojfázové soustavy je *součinitel napět'ové*, resp. *proudové nevyváženosti*. Definován je jako poměr amplitudy (nebo efektivní hodnoty) netočivé a sousledné složky napětí, resp. proudu (5). Vyvážená soustava se nazývá taková soustava, jejíž netočivá složka je rovna nule.

$$\begin{aligned}\nu_u &= \left| \frac{\hat{U}_0}{\hat{U}_1} \right| \cdot 100 (\%) \\ \nu_i &= \left| \frac{\hat{I}_0}{\hat{I}_1} \right| \cdot 100 (\%)\end{aligned}\tag{5}$$

## 2.5.3 Výpočet napět'ové nesymetrie ze sdružených hodnot napětí

V praxi se často používá vztah pro výpočet součinitele napět'ové nesymetrie z efektivních hodnot sdružených síťových napětí (6). Vztah je odvozen složitou matematickou úpravou vztahů pro náhradu fázových napětí složkovými. Tento výraz ovšem není analogický pro výpočet součinitele proudové nesymetrie pomocí síťových proudů.

$$\rho_u = \sqrt{\frac{U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2 - \sqrt{3 \cdot (U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2 - 6 \cdot (U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4)}}{U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2 + \sqrt{3 \cdot (U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2 - 6 \cdot (U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4)}}} \cdot 100 (\%)\tag{6}$$

kde:  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{31}$  jsou sdružená napětí

## 2.5.4 Orientační výpočet napět'ové nesymetrie při jednofázovém odběru

Pro orientační určení koeficientu napět'ové nesymetrie je také možné použít výpočet pomocí zdánlivého výkonu jednofázové zátěže a třífázového zkratového výkonu dle vztahu (7).

$$\rho_u \cong \frac{S_{1f}}{S''_{k3}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (7)$$

Při odvození jsou použita jistá zjednodušení, tedy vztah je pouze orientační.

## 2.5.5 Předepsané normativní hodnoty koeficientu napět'ové nesymetrie

Maximální přípustné hodnoty koeficientu napět'ové nesymetrie v distribučních sítích upravuje norma ČSN EN 50160 (Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě). Pro napět'ové hladiny vyšší než 35 kV je třeba brát v úvahu též Pravidla provozování distribučních soustav, příloha 3 (PPDS, P3). Jelikož trakční transformovny jsou napájeny z hladiny vvn 110 kV, nevystačíme pouze s normou ČSN EN 50160, ale je třeba vycházet i ze zmíněných Pravidel provozování distribučních soustav. Ty definují, že: „za normálních provozních podmínek musí být během každého týdne 95 % středních efektivních hodnot zpětné složky napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut menší než 1,5 % sousledné složky.“ [32] Norma ČSN EN 50160 definuje povolené meze koeficientu nesymetrie v rozmezí 0 % až 2 % (v některých oblastech až do 3 %). [30]

## 2.6 Definice harmonického zkreslení

Okamžité průběhy neharmonických měřených hodnot napětí a proudu, jakožto jediných měřitelných časových funkcí v elektrotechnice, můžeme vyjádřit Fourierovou řadou součtem harmonických funkcí:

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_{mh} \sin(h\omega t \pm \varphi_h). \quad (8)$$

Úroveň harmonického zkreslení časových průběhů vůči 1. harmonické můžeme posuzovat buď podle úrovně jednotlivých harmonických, nebo jejich kombinované působení reprezentované činitelem harmonického zkreslení. Pro monitoring zkreslení sledovaných veličin (napětí, proud) je vhodný činitel celkového harmonického zkreslení, zatímco pro úplnou expertízu signálu je vhodný časový průběh zkreslení a harmonická analýza.

Norma ČSN EN 61 800–3 definuje celkové zkreslení *TDR* (total distortion ratio) a celkový činitel zkreslení *TDF* (total distortion factor) následovně:

$$TDR = \frac{\sqrt{V^2 - V_1^2}}{V_1}, \quad TDF = \frac{\sqrt{V^2 - V_1^2}}{V}, \quad (9)$$

kde:

$V_1$       efektivní hodnota základní harmonické,  
 $V$         celková efektivní hodnota,

Symbol  $V$  ve vztahu označuje veličinu, která může být reprezentována proudem nebo napětím. Číselník zkreslení  $TDF$  je vztažen k efektivní hodnotě vyšetřované veličiny. Celkové zkreslení  $TDR$  je vztaženo k základní harmonické vyšetřované veličiny. Při aplikaci na napětí dává  $TDF$  a  $TDR$  přibližně stejný výsledek, zatímco při aplikaci na proud je rozdíl značný. Důvodem je skutečnost, že časový průběh síťového napětí je zkreslen méně než časový průběh proudu.

Vztáhneme-li vztahy pro  $TDF$  a  $TDR$  k odpovídající jmenovité hodnotě, přejdou vztahy (9) v následující:

$$TDR = \frac{\sqrt{V^2 - V_1^2}}{V_{1N}}, \quad TDF = \frac{\sqrt{V^2 - V_1^2}}{V_N} \quad (10)$$

Výše zmíněné vztahy ovšem zahrnují i mezipharmonické. Přítomnost mezipharmonických má za následek komplexnější účinky, neboť tvar vlny již není periodický. Jsou-li mezipharmonické zanedbatelné, tyto rovnice se zjednoduší na:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{k=40} V_k^2}}{V_{1N}}, \quad THF = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{k=40} V_k^2}}{V_N} \quad (11)$$

kde:

$V_{1N}$       jmenovitá efektivní hodnota základní harmonické,  
 $V_N$         je celková jmenovitá efektivní hodnota,  
 $V_h$         efektivní hodnota harmonické složky řádu  $h$ ,  
 $h$          řád harmonické

### 2.6.1 Harmonické v trakčním obvodu 25 kV, 50 Hz

Problematika harmonických se podstatně liší u obou trakčních soustav používaných u ČD. V případě stejnosměrné soustavy 3 kV doposud nevznikaly v nadřazené napájecí soustavě z hlediska harmonických závažnější problémy a ani do budoucna se v této oblasti neočekávají. Trakční usměrňovač TNS je zpravidla dvanáctipulzní a v proudu odebíraném ze sítě 22 kV tak vykazuje hodnoty počínaje 11. a 13. harmonickou a jejich násobky.



Jiná situace je v jednofázové soustavě 25 kV, 50 Hz, kde jsou převážně provozovány lokomotivy vybavené položenými můstkovými usměrňovači a regulací napětí trakčních motorů odbočkami na transformátoru. Kromě nesporných výhod jako je nenáročná údržba, výhodnější trakční charakteristiky, zlepšení adhezních poměrů nebo absence rozjezdových odporů mají tyto usměrňovače i svá negativa. Z hlediska EMC je jedním z hlavních problémů právě generování harmonických, jelikož na sběrači vykazují úplné spektrum proudových harmonických lichých řádů, počínaje řádem  $h = 3$  (150 Hz). Frekvence generovaných harmonických vychází ze vztahu:

$$h = k \cdot p \pm 1 \quad (12)$$

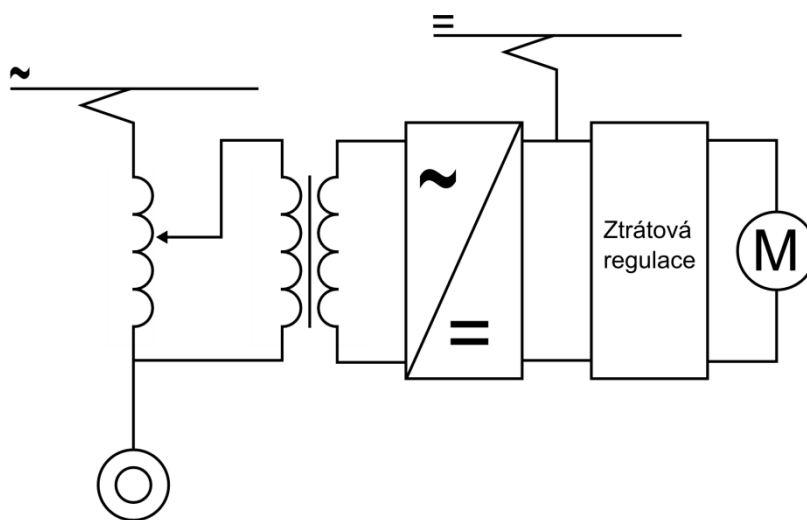
, kde  $k$  je celé číslo a  $p$  je počet pulzů usměrňovače.

Důsledkem vzniku harmonických složek v proudu odebíraném výše uvedeným hnacím vozidlem je:

- Deformace časového průběhu napětí v trolejovém vedení
- Snížení hodnoty účinnosti odebíraného výkonu, neboť se zde uplatní celkový účinník  $\lambda$  (činitel výkonu) [13]

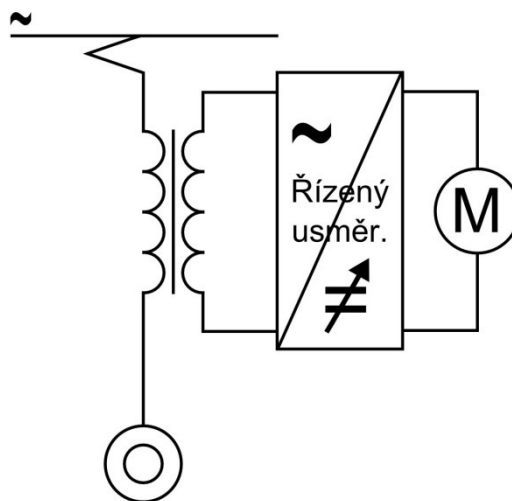
Spektrum rušivých kmitočtových složek v trakčním proudu je závislé jednak na napájecí soustavě a trakční napájecí stanici, jednak na hnacím vozidle, tj. typu trakčního motoru (stejnosměrný nebo střídavý asynchronní) a způsobu jeho regulace. Rychlý rozvoj výkonové elektroniky v posledním období vedl k několika odlišným principům regulace s výrazně odlišným spektrem rušivých vlivů. V následujících odstavcích je uveden jejich stručný přehled.

Nejstarší hnací vozidla pro střídavou trakční soustavu, označovaná také jako hnací vozidla první generace, se vyznačují stejnosměrnými trakčními motory, regulovanými změnou napájecího napětí a změnou buzení. Napětí je regulováno přepínáním odboček trakčního transformátoru a následně usměrňováno diodovým můstkovým usměrňovačem. Spektrum rušivých proudů odpovídá použitým neřízeným usměrňovacím členům ve vozidle. Blokové schéma hnacího vozidla první generace je na Obr. 2.6.



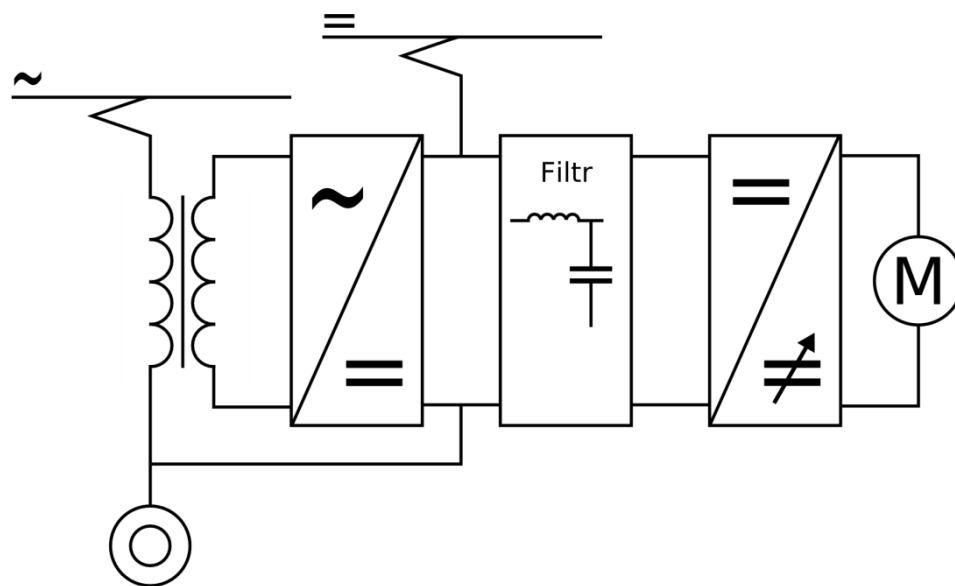
Obr. 2.6 Blokové schéma hnacího vozidla první generace

Snaha omezit ztráty při regulaci vedla k vývoji tzv. hnacích vozidel druhé generace, která jsou charakteristická stejnosměrnými motory a regulací napětí řízeným tyristorovým usměrňovacím můstkem. Blokové schéma hnacích vozidel druhé generace je na Obr. 2.7. K prvnímu uplatnění tohoto způsobu řízení napětí trakčních motorů došlo u vozidel pro střídavou trakci. Při tomto způsobu regulace napětí dochází k silnému tvarovému zkreslení odebíraného trakčního proudu v závislosti na úhlu otevření tyristorů v usměrňovacím můstku. V rušivém spektru jsou vlivem řízených tyristorových usměrňovačů zvýrazněny zejména všechny liché harmonické složky základního kmitočtu.



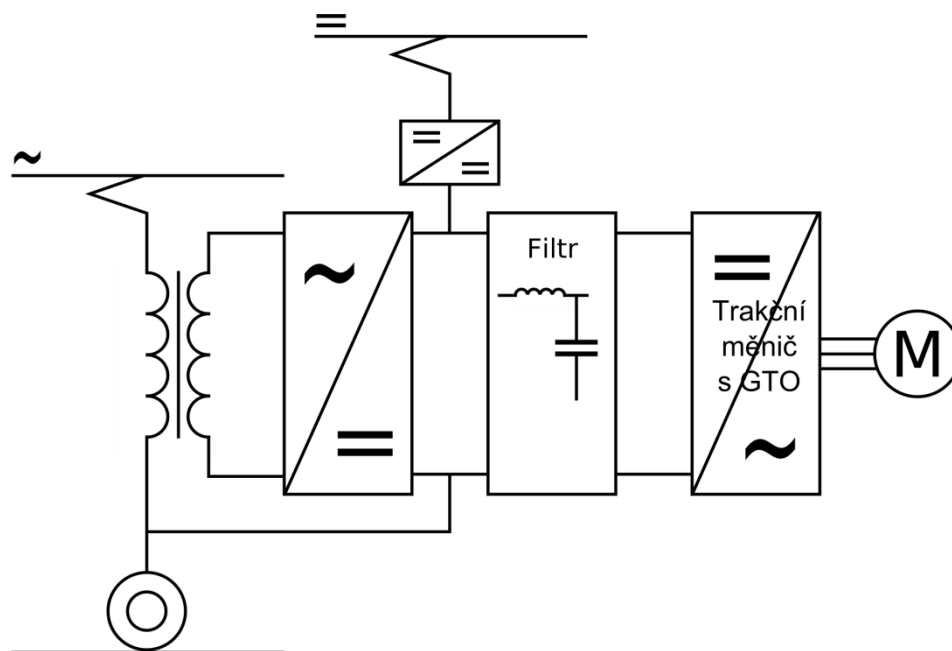
*Obr. 2.7 Blokové schéma hnacího vozidla druhé generace*

Další generace hnacích vozidel (třetí generace) se vyznačuje stejnosměrnými trakčními motory a nízkoztrátovou regulací. Měníče hnacích vozidel třetí generace využívají pulzně-šířkovou modulaci, tj. pracují s proměnnou šířkou impulsu na jednom nebo více nosných kmitočtech. Blokové schéma třetí generace hnacích vozidel je na Obr. 2.8. Tento způsob regulace napětí trakčních motorů se uplatnil jak u vozidel pro střídavou trakci, tak pro stejnosměrnou trakci. Rušivé spektrum obsahuje kmitočtové složky rovnající se řídicímu (nosnému) kmitočtu pulzního měniče a jejich násobkům. Pro jejich snížení je na vstupu zařazen LC filtr.



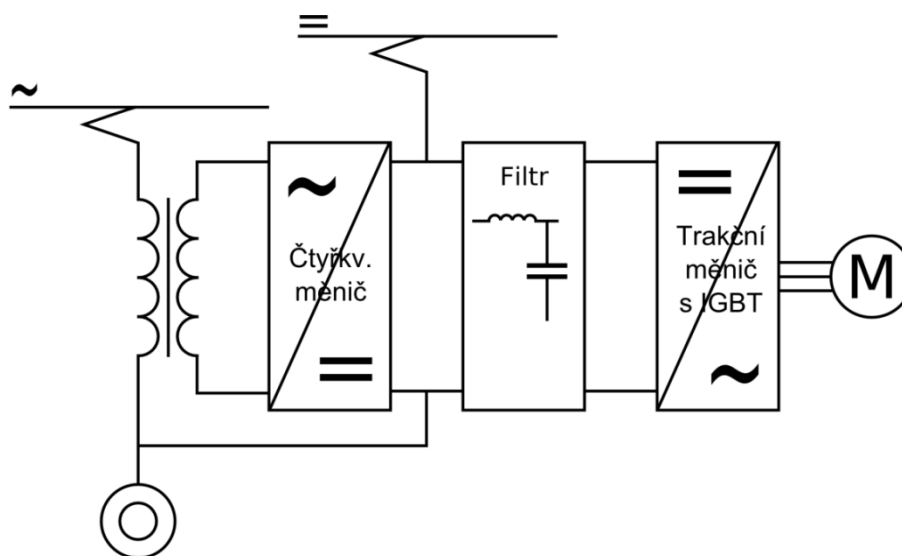
*Obr. 2.8 Blokové schéma hnacího vozidla třetí generace*

Dalším stupněm ve vývoji hnacích vozidel jsou vozidla tříapůlté generace. Zpočátku byly motory řízeny pomocí proudových střídačů, v současnosti je preferována regulace měniči s plynule proměnným napětím a frekvencí. Typické je zde použití trakčních měničů s výkonovými GTO tyristory při použití pulzně-šířkové modulace. Modulaci lze provádět buď při konstantním nosném kmitočtu a měnící se střídě signálu, nebo při konstantní šířce impulsu s měnící se periodou nosného kmitočtu. V reálných trakčních měničích se využívá kombinace obou způsobů (minimalizace spínacích ztrát na výkonových spínacích prvcích a optimalizace rychlosti odezvy při změnách). Nosný kmitočet měniče je řádově ve stovkách Hz. Spektrum rušivých kmitočtů je zde závislé na kmitočtu trakčního měniče a způsobu jeho regulace (sinusová modulace, obdélníkové řízení). Na stejnosměrné trakci se před trakční měnič předřazuje pomocný měnič snižující napětí přiváděné z troleje na stejnosměrné mezinapětí, kterým je pak napájen vlastní trakční měnič. Na střídavé trakci je před trakčním měničem zařazen navíc diodový můstek. Pro snížení vstupní impedance a rušivých kmitočtů je na stejnosměrném mezinapětí zařazen LC filtr typu dolní propust, s mezním kmitočtem přibližně 20 Hz. [13] Blokové schéma hnacího vozidla tříapůlté generace je na Obr. 2.9.



Obr. 2.9 Blokové schéma hnacího vozidla třípůlté generace

Posledním trendem ve vývoji hnacích vozidel jsou vozidla s využitím třífázových asynchronních trakčních motorů a trakčních měničů s výkonovými spínacími tranzistory IGBT, označované jako vozidla čtvrté generace. Výkonové trakční měniče jsou obvykle připojeny přes filtr LC přímo na trakční vedení. Kaskádní řazení výkonových měničů umožňuje vypuštění pomocného měniče na stejnosměrné trakci a na střídavé trakci se stejnosměrné mezinapětí získává pomocnými pulzními usměrňovači. Vlastní trakční měniče pracují s nosnými kmitočty řádově v jednotkách kHz a algoritmy jejich řízení (spolu s vlastnostmi pulzních usměrňovačů) umožňují i rekuperaci při brzdění. [13] Blokové schéma hnacího vozidla čtvrté generace je na Obr. 2.10.



Obr. 2.10 Blokové schéma hnacího vozidla čtvrté generace

Vzhledem k tomu, že ČD v současné době provozují prakticky všechny zmíněné typy hnacích vozidel, lze očekávat v trakčním proudu široké spektrum harmonických, z čehož vyplývá, že otázka harmonických trakčního odběru je stále aktuální.

Harmonické v trakčním obvodu se snažíme eliminovat, ať již pasivní nebo aktivní formou. Přítomnost proudových harmonických a jejich odpovídajících napěťových harmonických má totiž za následek vznik činné a jalové složky výkonu. Činný výkon harmonických přitom neprodukuje žádnou užitečnou práci, ale vytváří přídavné ztráty, které se projevují především ohříváním.

## 2.6.2 Hodnocení harmonických v trakčním obvodu

Vyhodnocování úrovně harmonického zkreslení se provádí opět v souladu s ČSN EN 50160 a Pravidly provozování distribučních soustav, přílohou 3 (PPDS, P3). Norma ČSN EN 50160 definuje jak mezní hodnoty činitele celkového harmonického zkreslení THD, tak i úrovně jednotlivých harmonických do řádu  $h = 25$ . Ovšem jak již bylo řečeno, je potřeba přihlížet i k PPDS. Dle PPDS za normálních provozních podmínek musí být během každého týdne 95 % průměrných hodnot celkového harmonického zkreslení THD v měřicích intervalech 10 minut v rozsahu podle. [32]

Tab. 2.2: *Mezní hodnoty THD pro jednotlivé napěťové hladiny*

Sít'	Max. amplituda harmonické $u_h$ [% $U_n$ ]	Max. THD [%]
110 kV	2,0	$\leq 2,5$
220 kV	1,5	$\leq 2,0$
400 kV	1,0	$\leq 1,5$

### 3 Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je vypracováním metodiky měření a analýzy vlivu spolupráce trakční soustavy a energetické soustavy z hlediska EMC dle příslušných norem a předpisů. Zjistit a srovnat v jakém rozmezí se pohybují hodnoty koeficientu napěťové nesymetrie a harmonického zkreslení generované trakční napájecí soustavou 25 kV, 50 Hz vůči napájecí distribuční soustavě 110 kV. Hodnoty získané praktickým měřením následně použít pro srovnání s hodnotami získanými modelováním přenosové cesty *napájecí síť 110 kV - vedení 110 kV - trakční transformátor - trakční vedení - trakční odběr*.

Specifikace dílčích úkolů práce je shrnuta v následujících bodech:

- Navržení, naprogramování a otestování měřicí aplikace vytvořené v prostředí LabVIEW pro měření v provozních podmínkách trakční transformovny střídavé trakční napájecí soustavy a v nadřazené rozvodně 110 kV.
- Vlastní měření v trakční transformovně Velešín na primární a sekundární straně trakčního transformátoru a v nadřazené rozvodně vodní elektrárny Lipno.
- Vyhodnocení naměřených dat. Výpočet koeficientu napěťové nesymetrie, devadesátipětí procentních percentilů koeficientu napěťové nesymetrie a celkového harmonického zkreslení. Výsledky prezentovat do grafů. Provést meziroční srovnání dat pro TT Velešín a srovnání dat z TT Velešín a VE Lipno
- Posouzení výsledků měření. Zda odpovídají maximálním přípustným hodnotám stanoveným normou ČSN EN 50160 a Pravidly provozování distribučních soustav, přílohou 3
- Z naměřených dat provést statistickou analýzu. Výsledky prezentovat do grafů. Provést meziroční srovnání dat pro TT Velešín a srovnání dat z TT Velešín a VE Lipno
- Vytvořit model přenosové cesty *napájecí síť 110 kV - vedení 110 kV - trakční transformátor - trakční vedení - trakční odběr*. Výsledky simulace srovnat s výsledky praktického měření.

## 4 Popis měřicího zařízení

Pro praktickou část disertační práce bylo mým cílem vytvořit a následně aplikovat v provozních podmínkách elektrické trakce měřicí aparaturu pro dlouhodobé měření elektrických veličin napětí a proudů, jakožto jediných měřitelných elektrických veličin primární (3-fázová síť 110 kV) i sekundární strany (jednofázová síť 25 kV) trakčního transformátoru.

### 4.1 Popis měřicího hardware

Celé zařízení se skládá z přenosného počítače, měřicí karty, vstupních převodníků, kabeláže a měřicího software, viz. Obr. 4.1.



*Obr. 4.1 Měřicí stanoviště v trakční transformovně*

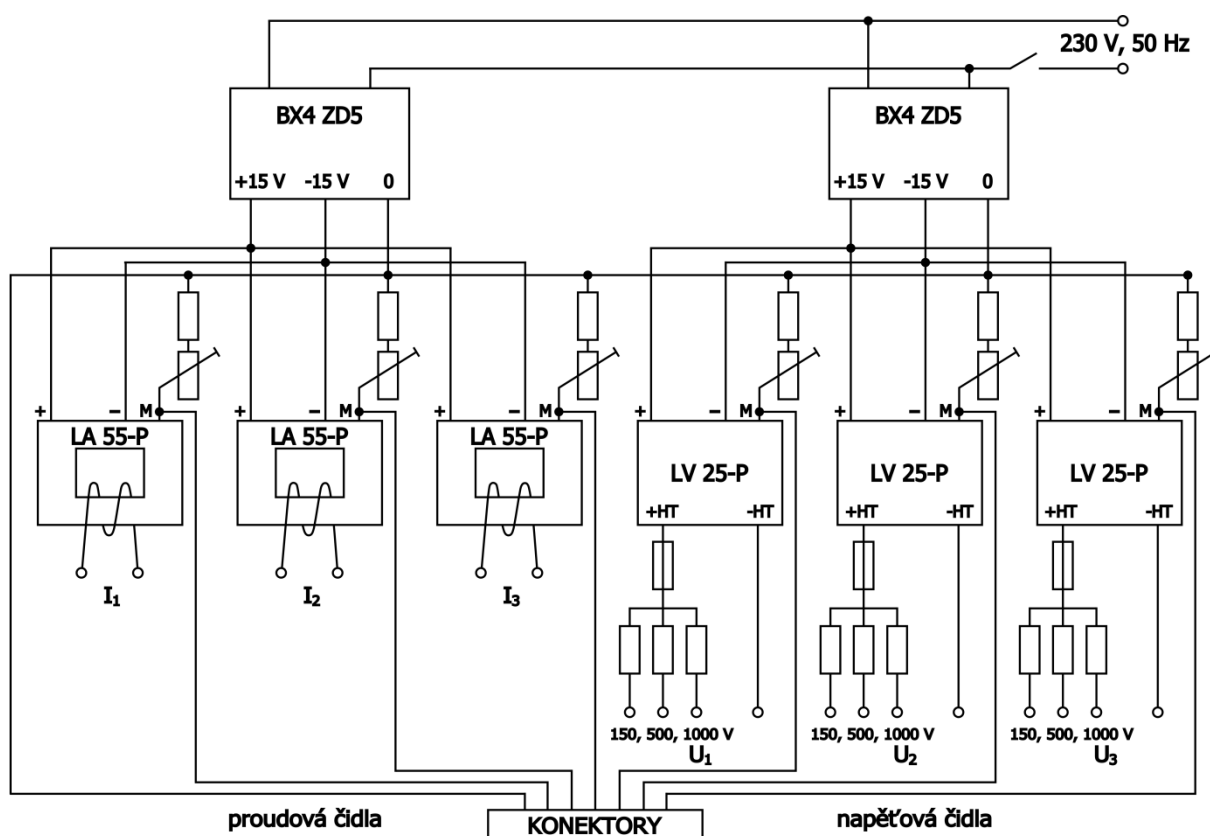
Jádrem měřicí aparatury je přenosný počítač s dvoujádrovým procesorem, operačním systémem MS Windows a 16-ti bitová, 8-mi kanálová měřicí karta USB-6210 firmy National Instruments. Šířka pásma měřicí karty je 450 kHz, maximální vzorkovací rychlost je 250 kS/s při měření na jednom kanále a vstupní rozsahy jsou od  $\pm 0,2$  V do  $\pm 10$  V.

Vzorkovací rychlost měřicí karty je nastavena na 25 kS/s na každý kanál. To znamená, že při síťovém kmitočtu 50 Hz, připadá na jednu periodu měřeného signálu 500 vzorků. Podle Shannon-Kotělnikova teorému, který říká, že vzorkovací kmitočet musí být alespoň dvojnásobkem nejvyššího kmitočtu, který chceme vyhodnocovat, můžeme tedy vyhodnocovat harmonické složky až do řádu 250. Podle ČSN EN 50160 a PPDS se THD vyhodnocují harmonické do řádu 40.

### 4.1.1 Vstupní převodníky

#### Přípravek A

Blokové schéma tohoto vstupního převodníku pro střídavé trojfázové měření je na Obr. 4.2. Převodník obsahuje tři čidla typu LA 55-P pro měření proudů až do 50 A (efektivní hodnota), čidla mají proudový výstup  $\pm 50$  mA. Proudová čidla jsou konstruována tak, že vstupní rozsah lze upravit změnou počtu závitů, kterými protéká měřený proud. Z důvodu větší přesnosti je vhodné při měření malých proudů, protáhnout proudovým čidlem větší počet smyček. Součet proudů jednotlivými smyčkami však nesmí přesáhnout dovolenou maximální hodnotu. Tato čidla zajišťují také dokonalé galvanické oddělení měřených proudů od obvodů měřicí karty i mezi sebou navzájem. Na výstupu čidel je připojen odpor (pevný odpor spolu s odporovým trimrem pro přesné nastavení), který převádí výstupní proud čidla na napětí v rozsahu  $\pm 5$  V. Dále obsahuje tři čidla LV 25-P pro měření napětí na rozsazích 150, 500 a 1000 V (efektivní hodnoty). Čidla mají proudový výstup  $\pm 25$  mA, který je opět pomocí odporů převeden na napětí  $\pm 5$  V. Vstupy napěťových čidel jsou od sebe také galvanicky odděleny. Vstupní proud napěťového čidla je při plném vstupním napětí 10 mA, což je dostatečně málo pro měření výstupu MTN.



Obr. 4.2 Vnitřní zapojení měřícího převodníku s LEM čidly (přípravek A)



### Přípravek B

Tento převodník je podobný převodníku *A* s tím rozdílem, že proudová čidla jsou typu LA 25-NP. Tato čidla se od LA 55-P liší tím, že nejsou průvlečné, ale počet smyček protékaných primárním proudem se nastavuje propojením vstupních a výstupních svorek. V mém případě jsou svorky zkratovány tak, aby jmenovitý primární proud měl hodnotu 12 A ( $I_{pmax} = 18$  A), tzn. podle propojení svorek 5-4-8-9-10, 6-7 a 3-2-1. Počet proudových i napěťových LEM čidel je stejný jako v přípravku *A*.

## **4.2 Popis měřicího software**

Programová aplikace byla vytvořena na bázi virtuální instrumentace ve vývojovém prostředí LabVIEW 8.5 (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) firmy National Instruments. Jde o graficky orientované vývojové prostředí s bohatými knihovnami pro vytváření aplikací zaměřených na oblast měření. Vytvořená programová aplikace je určena pro kontinuální záznam měřených veličin, který umožňuje offline diagnostiku uložených naměřených dat.

### **4.2.1 Virtuální měřicí technika**

Klasické analogové měřicí systémy bez komunikačního rozhraní (voltmetry, ampérmetry, multimetry, osciloskopy, ...) jsou charakteristické svou nízkou flexibilitou. Uživatel může vybírat jen z omezených, výrobcem jednoznačně definovaných, funkcí. Konfigurace měřicího přístroje se přitom provádí ručně, což může být značně zdlouhavý proces. Při odečítání naměřených hodnot navíc vzniká riziko ovlivnění naměřených hodnot hrubými chybami měření (osobní chyba).

Vývojový mezistupeň mezi klasickými měřicími přístroji a virtuální instrumentací tvoří měřicí přístroje s komunikačním rozhraním. Z měřicího přístroje jsou využity pouze vstupní obvody a paměť dat. Uživatel s měřicím přístrojem komunikuje pomocí počítače přes komunikační rozhraní.

Až následný nástup virtuální instrumentace zcela změnil pohled na měřicí přístroje. Podstatou virtuálního měřicího přístroje je doplnění počítače vstupně/výstupní kartou (někdy též nazývanou měřicí nebo DAQ) a vytvoření vhodného software, který realizuje všechny činnosti měřicího přístroje. Výrobce je schopen vytvářet, nebo měnit vlastnosti stávajících měřicích přístrojů přesně podle měřicích se požadavků koncového uživatele. Nezanedbatelná je pro zákazníka i nižší cena takto vytvářených měřicích přístrojů oproti klasické analogové měřicí technice. Navíc je možno kdykoliv změnou programu vytvořit jiný měřicí přístroj nebo upravit vlastnosti stávajícího. Virtuální instrumentace tvoří nejvyšší stupeň nového přístupu k měření. Srovnání klasických měřicích přístrojů a virtuálních měřicích přístrojů ukazuje tabulka Tab. 4.1. [25]

Tab. 4.1: Srovnání klasické a virtuální měřicí techniky

Hledisko	Tradiční přístroj	Virtuální přístroj
<b>Funkce definuje</b>	výrobce	uživatel
<b>Orientace přístrojů a jejich propojitelnost</b>	specifické podle funkcí, hlavně používané samostatně s omezenou propojitelností	specifické podle aplikace, propojitelnost s návazností na počítačové sítě a periférie
<b>Klíčový komponent</b>	hardware	software
<b>Náklady na výrobu a opakovatelnost použití</b>	vysoké	nízké, opakovatelně použitelné
<b>Architektura</b>	uzavřená, pevná množina funkcí	otevřená, pružná funkčnost odrážející výkonnost výpočetní techniky
<b>Návaznost na technologický proces</b>	pomalá - doba obměny 5 - 10 let	rychlá – doba obměny 1 - 2 roky
<b>Náklady na vývoj a údržbu</b>	vysoké, horší poměr výkon/cena	nízké, dobrý poměr výkon/cena

Analýzou procesu měření a zpracování měřených dat lze dojít k následujícímu obecnému schématu procesu měření:

- *fáze sběru dat* - získání tzv. surových dat. Obvykle se jedná o převod měřené veličiny na elektrický signál nesoucí informaci o měřené veličině a jeho převod na číselnou hodnotu. Tato je předána počítači a uložena do paměti či zobrazena na displeji.
- *fáze analýzy naměřených dat* - odstranění nežádoucích složek měřených signálů (odstranění rušení), statistického vyhodnocení (např. výpočet střední či efektivní hodnoty), výpočet nepřímo měřených veličin z veličin měřených (např. nepřímé měření odporu měřením napětí a proudu) atp.
- *fáze prezentace naměřených a analyzovaných dat* - prezentace naměřených a analyzovaných hodnot např. ve formě protokolu z měření, grafů, uložením do textových datových souborů atp. [25]

#### 4.2.2 Vývojové prostředí LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench)

Podstatou virtuálního měřicího přístroje je doplnění počítače vstupně/výstupní kartou a vytvoření vhodného počítačového programu, který realizuje všechny činnosti měřicího přístroje. Zabraňuje se tak i duplicitě, která se objevuje při propojení měřicího přístroje s komunikačním rozhraním a počítače – obě oblasti techniky (měřicí i výpočetní) využívají zpravidla stejných komponent a stejné základní architektury. Pro snadné a efektivní ovládání virtuálního měřicího přístroje je nutné mít především kvalitní software. Tyto požadavky splňuje vývojové prostředí LabVIEW firmy National Instruments.

Vychází se z poznatku, že tím, kdo ví co měřit, jak analyzovat a jak prezentovat data je technik. Ten ale nemusí být sám zkušeným programátorem. Své představy tedy předává, obvykle v podobě blokového schématu, programátorovi. Programátor toto schéma potom převádí do syntaxe zvoleného programovacího jazyka, což je činnost poměrně zdoluhavá a náročná na přesnost a nepřináší již do procesu měření obvykle žádné další nové informace. Cílem vývojového prostředí LabVIEW je tedy to, aby blokové schéma bylo koncovým tvarem aplikace, který se již dále nebude převádět do textové podoby.

LabVIEW je tedy vývojovým prostředím na úrovni např. C jazyka. Na rozdíl od něj není orientován textově, ale graficky. Výsledný produkt tohoto vývojového prostředí se nazývá virtuálním přístrojem (Virtual Instrument), protože svými projevy a činnostmi připomíná klasický přístroj ve své fyzické podobě. [6]

Virtuální přístroj se vyznačuje a obsahuje:

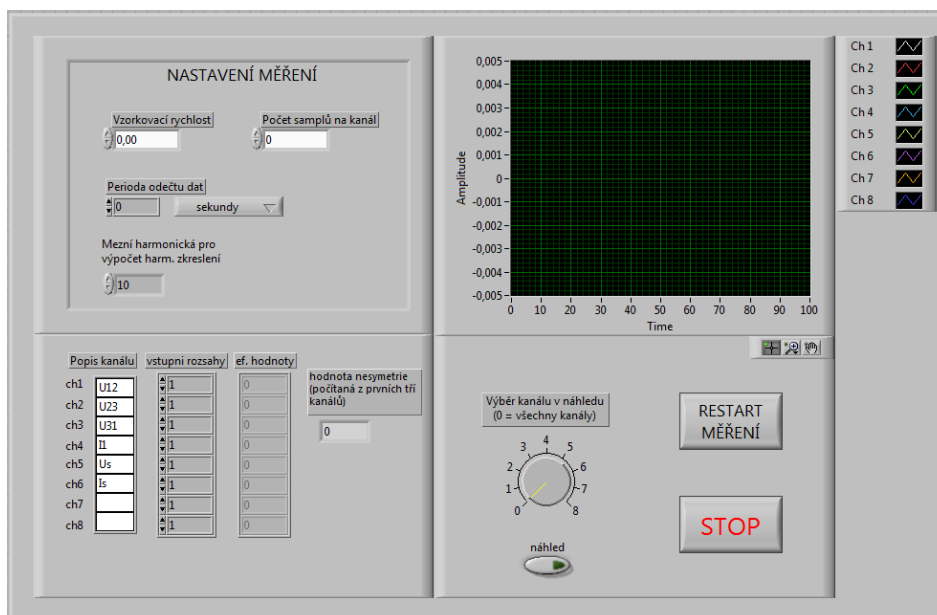
- Interaktivní grafické rozhraní ke koncovému uživateli (Graphical User Interface - GUI) - tzv. čelní panel (Front Panel), který simuluje čelní panel fyzického přístroje. Obsahuje prvky pro ovládání a indikaci (knoflíky, tlačítka, LED indikátory, grafy ...). Tento čelní panel ovládá uživatel myší nebo z klávesnice.
- Činnost virtuálního přístroje je dána jeho blokovým schématem (Block Diagram). Toto blokové schéma je vytvořeno ikonami reprezentujícími v koncových blocích ovládací a indikační prvky čelního panelu a ve svých uzlových blocích jsou to bloky zpracovávající procházející data. Tento blokový diagram je zdrojovou podobou každé aplikace.
- Virtuální přístroj má hierarchickou a modulární strukturu. Lze jej používat jako celý program nebo jeho jednotlivé podprogramy, které se nazývají podřizenými virtuálními přístroji (SubVI). Součástí každého virtuálního přístroje je jeho ikona, kterou je prezentován v blokovém schématu a konektor s přípojnými místy pro vstupní a výstupní signály.

Těmito charakteristickými rysy naplňuje vývojové prostředí LabVIEW podmínky modulárního programování. Svou aplikaci dělí uživatel na jednotlivé úlohy, pro které vytváří dílčí virtuální přístroje (SubVI) a z nich potom buduje celou aplikaci jejich spojováním do výsledného virtuálního přístroje. Na závěr lze celou aplikaci přeložit do EXE tvaru a provozovat nezávisle na vývojovém prostředí. Díky možnosti vyzkoušet funkci každého dílčího virtuálního přístroje nezávisle na jiných a díky bohaté škále ladicích prostředků je ladění aplikace velmi snadné.

Celý vývojový systém (Full Development Package) sestává ze základní části (Base Package - bez knihovny Advanced Analysis, obsahuje však knihovny GPIB, RS-232, Data Acquisition, a Base Analysis) a rozšířené analyzační knihovny (Advanced Analysis Library - statistika, lineární algebra, operace s poli, generování signálu, zpracování signálu, digitální filtry, okénkové funkce). Lze jej dále doplnit např. o překladač aplikací do tvaru \*.EXE (Application Builder) nebo o další nadstavby pro rozšíření knihoven (SQL Toolkit pro podporu databází, PID regulátor, VXI knihovna apod.). [6]

### 4.2.3 Popis programu určeného k měření v trakční transformovně

Měřicí aplikace pro měření v trakční transformovně byla navržena pro dlouhodobé měření elektrických veličin napětí a proudů trakčního transformátoru. Jádrem měřicí aparatury je přenosný počítač s dvoujádrovým procesorem, operačním systémem MS Windows a 16-ti bitová, 8-mi kanálová měřicí karta USB-6210 firmy National Instruments. Měřicí program pro měření v trakční transformovně je vytvořen ve vývojovém prostředí LabVIEW 8.5 firmy National Instruments. Program provádí kontinuální snímání okamžitých hodnot všech měřených veličin nastavenou vzorkovací rychlostí. V případě mého měření 25 kS/s na kanál, což při síťové frekvenci 50 Hz znamená, že na jednu periodu připadá 500 vzorků. Teoreticky by tedy dle Shannon-Kotělnikova teorému bylo možné analyzovat harmonické až do řádu 250. Naměřené hodnoty jsou ukládány na disk o dostatečné kapacitě pro následnou analýzu a případnou prezentaci. Samotný program má několik podprogramů, nicméně ovládání je snadné a velmi intuitivní. Čelní panel měřicí aplikace je zobrazen na Obr. 4.3.

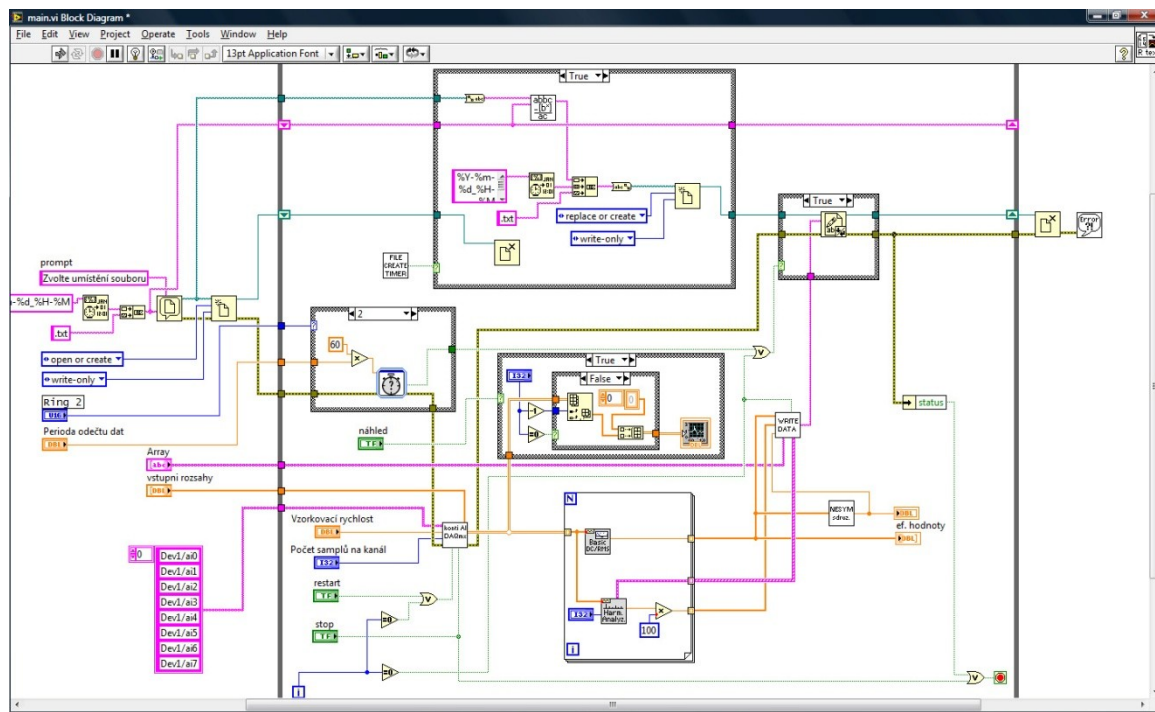


Obr. 4.3 Čelní panel vytvořené měřicí aplikace

Odečet dat pracuje na principu kontinuálního „bufferového“ snímání tak, že samotné měření napěťového a proudového signálu probíhá na pozadí (rezidentně), a na popředí program vyčítá hodnoty z kruhové paměti, které se dále mohou zpracovávat. Kruhová paměť je rozdělena na dvě části. V prvním intervalu měřicí karta zapíše naměřené hodnoty do části I a program zpracuje již naměřené hodnoty z části II. V druhém intervalu měřicí karta přepíše vyhodnocené hodnoty v části II a program vyčte čerstvě naměřená data z části I.

Pro správnou činnost měření je třeba před každým měřením nastavit některé prvky typu *control*. Především jde o vzorkovací rychlost, počet samplů na kanál, periodu odečtu dat, vstupní rozsahy jednotlivých kanálů (obvykle v závislosti na výstupech měřicích transformátorů), případně mezní harmonickou pro výpočet harmonických a činitele celkového harmonického zkreslení *THD*. Mimoto je vhodné vyplnit i popisy jednotlivých měřených kanálů pro snadnější orientaci při vyhodnocování.

Napravo od vstupních rozsahů jsou náhledy efektivních hodnot a aktuální hodnota koeficientu napěťové nesymetrie počítaná z prvních tří kanálů. Napěťová nesymetrie je počítaná ze vztahu (6) pro sdružená napětí.



Obr. 4.4 Část blokového diagramu vytvořené měřicí aplikace

Měřená data jsou ukládána v textové formě do souboru ve formátu „RRRR-MM-DD\_hh-mm.txt“, který udává rok, měsíc, den, hodinu a minutu založení souboru. Kde *RRRR* je rok, *MM* je měsíc, *DD* je den, *hh* je hodina a *mm* je minuta. Každý soubor obsahuje šest hodin záznamu. To znamená, že vždy po šesti hodinách záznamu je aktuální soubor uzavřen a následně je vytvořen soubor nový. Tento způsob ukládání jsem zvolil jednak kvůli lepší přehlednosti velkého množství dat, ale především z toho důvodu, že nelze vyloučit riziko „pádu“ měřicí aplikace nebo operačního systému. To by v případě ukládání všech dat do jediného souboru vedlo ke ztrátě neuložených dat. Použitím výše zmíněného způsobu ukládání se nebezpečí ztráty dat eliminuje.

Měřené hodnoty z jednotlivých kanálů jsou ukládány po řádcích do textového souboru. Na začátku každého řádku je datum a čas odečtu (závislé na nastavení systému). Následují efektivní hodnoty všech měřených kanálů, hodnota koeficientu napěťové nesymetrie počítaná z prvních tří kanálů a informace o harmonickém zkreslení. Jednotlivé hodnoty jsou odděleny tabulátorem.

Pro náhled časových průběhů měřených napětí a proudů během měření slouží zobrazovač typu *waveform graph*. Kruhový volič umožňuje volbu zobrazovaného kanálu, případně zobrazení všech kanálů najednou (volba 0). Náhled je možné deaktivovat, aby při měření (zvláště na slabších PC) zbytečně nevytěžoval procesor a nezvyšoval tak riziko zhroucení systému. Pro zastavení programu slouží tlačítko „STOP“.

### 4.3 Chyby měření

Žádný měřicí přístroj neměří absolutně přesně a žádným měřením se tedy nezíská naprosto přesná hodnota měřené veličiny. Přesnost prováděného měření se vyjadřuje pomocí chyby měření. Analýza chyb je základní podmínkou zvyšování přesnosti měření. Výsledek měření je neúplný, pokud neobsahuje možný rozsah chyb, čili tzv. neurčitost měření.

Změřená hodnota  $X_M$  měřené veličiny se liší od její skutečné hodnoty  $X_S$ . Rozdíl těchto hodnot nazýváme absolutní chybou. Absolutní chyba  $\Delta$  je definována vztahem:

$$\Delta = X_M - X_S \quad (13)$$

Absolutní chyba má stejný rozměr jako měřená veličina.

Při udávání přesnosti měřicí metody se nejčastěji používá poměrné neboli relativní chyby měření

$$\delta = \frac{\Delta}{X_M} \quad (14)$$

nebo

$$\delta = \frac{\Delta}{X_M} \cdot 100 \quad (15)$$

[%]

nebo

$$\delta = \frac{\Delta}{X_M} 10^6 \quad (16)$$

[p.p.m.]

V praxi se často setkáváme s tím, že výsledek měření je dán součtem (rozdílem), nebo součinem (podílem) několika měřených hodnot. V případě součtu (rozdílu) dvou veličin je výsledná absolutní chyba součtem absolutních chyb vstupních veličin, dle vztahu (17).

$$f(X, Y) = X \pm Y \quad (17)$$
$$\Delta_{(f(X, Y))} = \Delta_{(X)} + \Delta_{(Y)}$$

V případě součinu (podílu) dvou veličin je relativní chyba výsledku dána součtem relativních chyb vstupních veličin, dle vztahu (18).

$$f(X, Y) = X \cdot Y \quad \text{nebo} \quad f(X, Y) = \frac{X}{Y} \quad (18)$$
$$\delta_{(f(X, Y))} = \delta_{(X)} + \delta_{(Y)}$$

Získáme-li tedy naměřenou hodnotu pomocí měřicího řetězce (MTP+LEM+měřicí karta...), musíme při stanovování chyby měření uvažovat každou jeho část jako zdroj potenciální chyby. Výsledná relativní chyba měření je pak dána součtem relativních chyb jednotlivých částí řetězce podle vztahu (19):

$$\delta = \delta_{(1)} + \delta_{(2)} + \delta_{(3)} + \dots + \delta_{(n)} \quad (19)$$

Chyby dělíme podle toho, jak se projevují při opakovaných měřeních na chyby systematické a chyby náhodné. Zůstává-li chyba při opakovaných měřeních téže veličiny stejná, nebo se předvídatelným způsobem mění, mluvíme o tzv. systematické chybě.

$$\Delta_{\text{sys}(X)} = \bar{X} - X_S \quad (20)$$

$$\delta_{\text{sys}(X)} = \frac{\Delta_{\text{sys}(X)}}{X_S} \cdot 100 \quad (\%) \quad (21)$$

kde  $\bar{X}$  je výběrový průměr z  $N$  opakovaných měření  $X_i$

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (22)$$

Systematickou chybou může být například chyba metody (zanedbání vlivu odporu voltmetru na měřené napětí zdroje s nenulovým vnitřním odporem), chyba nuly – offsetu (výstupní hodnota převodníku při nulové hodnotě měřené veličiny), chyba zesílení.

Mění-li se chyba při opakovaných měřeních téže veličiny při stejných podmínkách nepředvídatelně, jedná se o tzv. náhodnou chybu. Příkladem náhodné chyby mohou být šумы, neznámé změny podmínek měření (teplota, vlhkost, rušivé elektromagnetické pole, atd.), zaokrouhlování výsledku měření. [25]

#### 4.4 Přesnost měření měřicí aplikace

- chyba měřicích transformátorů proudu i měřicích transformátorů napětí, použitých při měření, činí 0,5 %.
- chyba napěťových LEM čidel LV 25 – P, kterou udává výrobce pro teplotu okolí 25°C a napájecí napětí  $\pm 15$  V, činí 0,8 % (tyto podmínky jsou v TT dodrženy).
- chyba proudových LEM čidel LA 25 – NP, kterou udává výrobce pro teplotu okolí 25°C a napájecí napětí  $\pm 15$  V, činí 0,5 %.
- chyba proudových LEM čidel LA 55 – P, kterou udává výrobce pro teplotu okolí 25°C a napájecí napětí  $\pm 15$  V, činí 0,65 %.
- chyba klešťových ampérmetrů E3N od firmy Chauvin Arnoux s šířkou pásma 0 – 100 kHz a rozsahy 10 – 100 A je 3 a 4 % (použit rozsah 10 A)
- Chyba měřicí karty dle aplikace „Accuracy Calculator“, kterou nalezneme na webových stránkách výrobce, je uvedena v Tab. 4.2 pro oba použité rozsahy karty.

Tab. 4.2: Chyba měřicí karty

Signal Range for DAQ device	$\pm 5$ V	$\pm 1$ V
Polarity	Bipolar	Bipolar
Operating Temperature	25°C	25°C
Number of readings	Single point reading	Single point reading
Time from last calibration	1 year	1 year
Absolute Accuracy	$\pm 1.6166$ mV	$\pm 0.3590$ mV
Accuracy RTI	$\pm 0.0323$ %	$\pm 0.0359$ %

Celková chyba při měření střídavého napětí je:

$$\delta_U = 0,5 + 0,8 + 0,032 = 1,332\%$$

Celková chyba při měření střídavého proudu LEM čidlem LA 25 – NP:

$$\delta_{I-LEM} = 0,5 + 0,5 + 0,032 = 1,032\%$$

Celková chyba při měření střídavého proudu klešťovým ampérmetrem:

$$\delta_{I-kleště} = 0,5 + 3 + 0,036 = 3,536\%$$



## 5 Měření v trakční transformovně

V rámci praktické části disertační práce jsem provedl měření v provozních podmínkách SŽDC, s.o. a v nadřazené rozvodně 110 kV. Před měřením v trakční transformovně proběhla kalibrace LEM čidel a dlouhodobé testování funkčnosti a stability měřicího systému v laboratorních podmínkách. Vlastní měření probíhalo ve dvou po sobě následujících letech. V roce 2009 jsem měřil v trakční transformovně Velešín, a to od pondělí 13.7. od 12:28 do následujícího pondělí 20.7. do 12:30. V roce 2010 pak měření probíhalo na dvou místech současně. První měřicí stanoviště bylo zřízeno v trakční transformovně Velešín. Zde se měřilo od pondělí 19.7. do 11:00 do pondělí 26.7. do 9:56. Druhé měřicí stanoviště bylo zřízeno v nadřazené rozvodně 110 kV v Lipně nad Vltavou.

V rozvodně VE Lipno muselo být bohužel měření z provozních důvodů časově omezeno. Měření zde probíhalo od pondělí 19.7. od 13:00 do soboty 24.7. do 12:11. Pro měření byla použita měřicí aparatura popsaná v kapitole 4. K vyhodnocení byl využit tabulkový procesor MS Excel. Jelikož jsou všechny datové soubory co do formátu ukládání shodné, lze aplikací vytvořené „šablony“ počítat např. použité klouzavé průměry apod. Důvodem pro využití MS Excel jako nástroje pro vyhodnocení dat bylo jednak jeho snadné a intuitivní ovládání, ale především jeho možnosti spojené s prezentací výsledných dat. Data jsou vyhodnocována v souladu s ČSN EN 50160 a Pravidly provozování distribučních soustav, přílohou 3.

### 5.1 Trakční transformovna Velešín

Trakční transformovna Velešín za normálních okolností napájí střídavým napětím 27 kV asi 40-ti kilometrový úsek od *Českých Budějovic - Rožnova* po stanici *Rybník*. Jedná se o standardní zapojení trakční transformovny, tj. ze dvou nezávislých vedení 110 kV jsou přes rozvodnu typu „H“ napájeny dva trakční transformátory EJRH 28M-O, z nichž v provozu je vždy jen jeden. Jedna strana je napájena linkou 1366 z rozvodny Škoda, druhá strana je napájena linkou 1374 z vodní elektrárny Lipno. Na sekundární straně trakčního transformátoru je filtračně kompenzační zařízení pro filtraci 3. a 5. harmonické spolu s dekompenzační větví.



Obr. 5.1 Rozvodna 110 kV trakční transformovny Velešín

Tab. 5.1: Parametry trakčního transformátoru EJRH 28M-O

jmenovitý zdánlivý výkon	12,5 MVA
jmenovité napětí primární strany	110 kV $\pm 8 \times 2\%$
jmenovité napětí sekundární strany	27 kV
proudový převod	$p_i = 113,6/463$ (A)
procentní napětí nakrátko	$u_k = 11,9 \%$
ztráty nakrátko	$\Delta P_K = 80 \text{ kW} \pm 15\%$
ztráty naprázdno	$\Delta P_0 = 10,94 \text{ kW}$
proud naprázdno	$I_0 = 0,205 \%$

Tab. 5.2: Parametry filtračně-kompenzačního zařízení v TT Velešín

dekompenzační větev	$L_{1D} = 21,6 \text{ mH}$
filtr 3. harmonické	$R_{3F} = 0,7 \Omega$ , $L_{3F} = 196 \text{ mH}$ , $C_{3F} = 6,24 \mu\text{F}$
filtr 5. harmonické	$R_{5F} = 0,7 \Omega$ , $L_{5F} = 91 \text{ mH}$ , $C_{5F} = 4,68 \mu\text{F}$

Parametry trakčního vedení:

$$R_k = 0,22 \Omega/\text{km}, L_k = 1,43 \text{ mH}/\text{km}, C_k = 20,5 \text{ nF}/\text{km}, l = 40 \text{ km}$$

V trakční transformovně Velešín byla měřena jak napětí, tak proudy a to na primární i sekundární straně trakčního transformátoru. Napětí na primární straně bylo měřeno přes MTN 110/0,1 kV pomocí měřicího přípravku s LEM čidly. Proud primární strany trakčního transformátoru byl měřen přes MTP 100/5 A pomocí klešťových ampérmetrů E3N firmy Chauvin Arnoux na rozsahu 100mV/A. Napětí sekundární strany bylo měřeno přes MTN 27/0,1 kV opět přes měřicí přípravek s LEM čidly. Proud sekundární strany byl měřen přes MTP 600/5 A a to opět pomocí klešťových ampérmetrů E3N firmy Chauvin Arnoux na rozsahu 100mV/A.



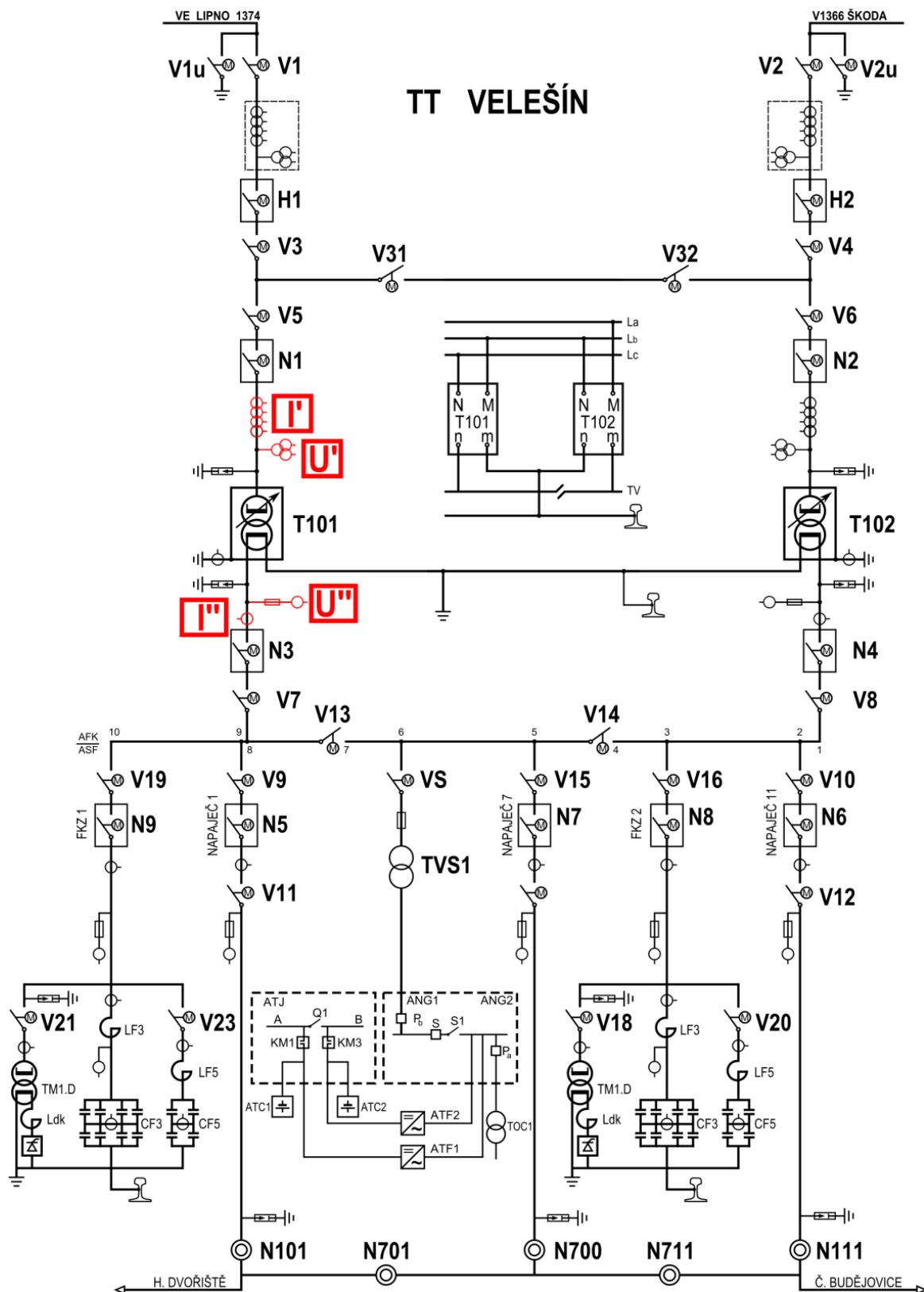
a)



b)

*Obr. 5.2 Rozvodna 27 kV trakční transformovny Velešín (a) a řídicí systém filtračně-kompenzačního zařízení (b)*

Jednopolové schéma trakční transformovny Velešín je na Obr. 5.3. V době měření byl v provozu trakční transformátor T101. Měřicí body na primární straně trakčního transformátoru jsou ve schématu označeny  $U'$ ,  $I'$  a měřicí body na sekundární straně jsou označeny  $U''$ ,  $I''$ .



Obr. 5.3 Jednopolové schéma trakční transformovny Velešín

## 5.2 Rozvodna 110 kV vodní elektrárny Lipno

Vodní elektrárna Lipno se nachází přibližně 35 km jihozápadně od trakční transformovny Velešín. Tato vodní elektrárna je součástí Vltavské kaskády a její nádrž představuje svou plochou naše největší umělé jezero.[27] Elektrárna pracuje v generátorovém režimu přibližně 6 hodin denně. S trakční transformovnou Velešín je rozvodna této elektrárny spojena vedením 1374 na napětíové hladině 110 kV. Propojení VE Lipno a TT Velešín je na Obr. 5.4. Elektrárna Lipno je označena „ELI“, trakční transformovna Velešín je označena „TTE“.

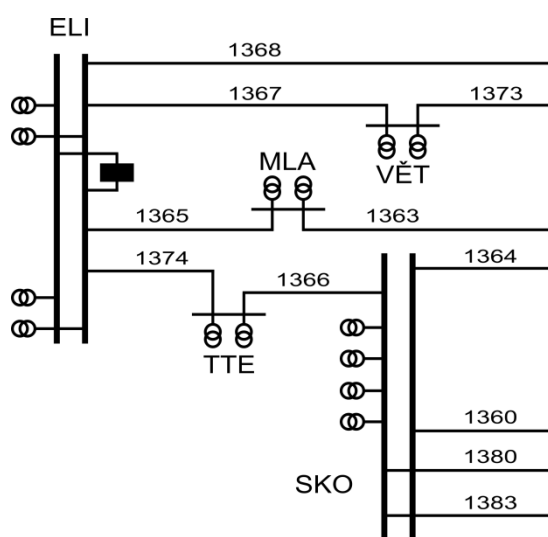
Parametry vedení 110 kV spojujícího VE Lipno s TT Velešín s délkou vedení 35 km:

$$R_K = 0,156 \, \Omega/\text{km}$$

$$L_K = 1,25 \, \text{mH}/\text{km}$$

$$C_K = 9,92 \, \mu\text{F}/\text{km}$$

V rozvodně 110 kV vodní elektrárny Lipno byla na konci vedení spojujícího VE Lipno s TT Velešín měřena tři sdružená napětí a odpovídající proudy. Napětí bylo měřeno přes MTN 110/0,1 kV pomocí měřicího přípravku s LEM čidly. Proud byl měřen přes MTP 100/5 A pomocí klešťových ampérmetrů E3N a LEM čidel.



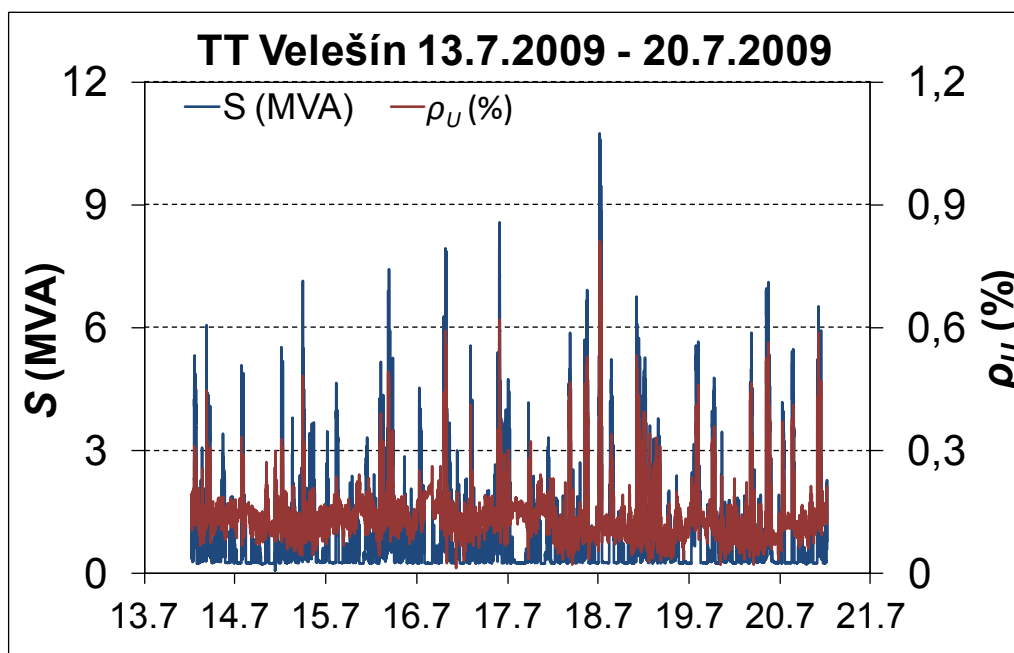
Obr. 5.4 Připojení trakční transformovny Velešín k vodní elektrárně Lipno linkou 110 kV

## 5.3 Naměřené hodnoty sledovaných veličin

V následujících odstavcích jsou uvedeny týdenní průběhy naměřených veličin z jednotlivých měřicích stanovišť, hodnoty 95-ti procentních percentilů, vzájemné srovnání mezi jednotlivými měřicími stanovišti a meziroční rozdíly.

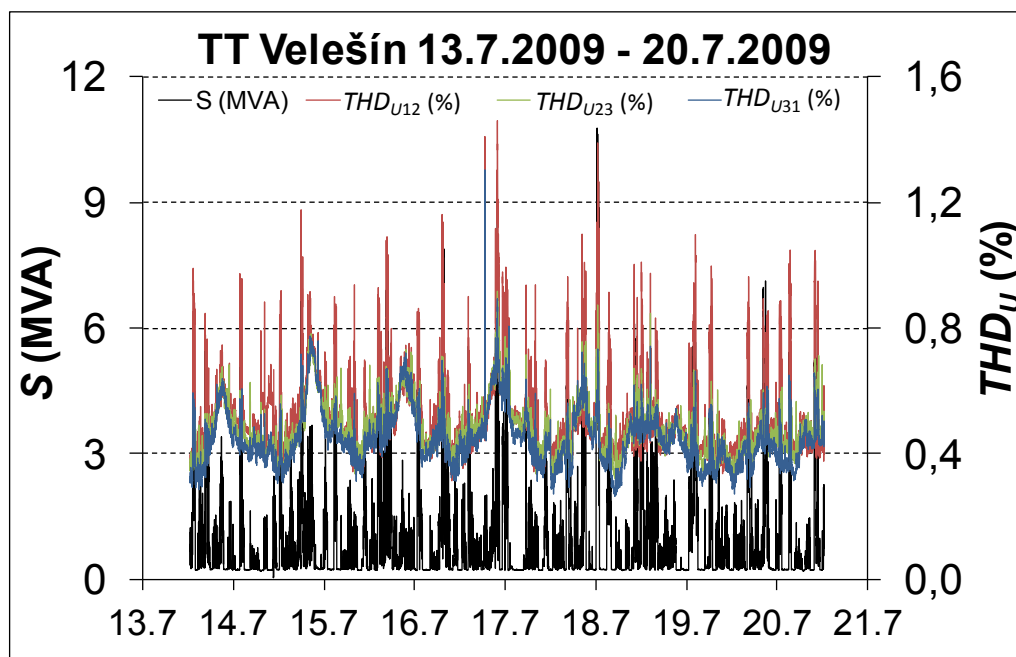
### 5.3.1 Naměřené hodnoty z trakční transformovny Velešín v roce 2009

Na Obr. 5.5 je graf týdenního průběhu desetisekundových průměrů koeficientu napěťové nesymetrie  $\rho_U$  v závislosti na čase pro měřené období od 13.7. do 20.7. 2009. Desetisekundové průměry měřených hodnot pro grafické zobrazení byly zvoleny na základě technického omezení vykreslování grafů v MS Excel (maximální počet vykreslených bodů pro spojnicový graf je 32000). Hodnoty koeficientů napěťové nesymetrie jsou vypočtené z hodnot sdružených napětí dle vztahu (6). Hodnoty koeficientu  $\rho_U$  jsou dány do konfrontace se zdánlivým výkonem odebíraným na primární straně trakčního transformátoru. V grafu je jasně patrná závislost napěťové nesymetrie na odebíraném výkonu, což je dobře pozorovatelné především ve špičkách výkonu, resp. koeficientu  $\rho_U$ . Maximální hodnota odebíraného výkonu změřená na primární straně trakčního transformátoru je 10,76 MVA. Nejvyšší hodnota koeficientu napěťové nesymetrie je 1,08 %.



Obr. 5.5 Průběh zdánlivého výkonu a koeficientu napěťové nesymetrie v TT Velešín v roce 2009 po dobu měření

Na Obr. 5.6 je srovnání průběhu desetisekundových průměrů hodnot primárního výkonu s desetisekundovými průměry hodnot koeficientů celkového harmonického zkreslení  $THD_U$  všech tří sdružených napětí. Nejvyšší hodnota koeficientu celkového harmonického zkreslení pro napětí  $U_{12}$  byla  $THD_{U12} = 1,46\%$ , pro napětí  $U_{23}$  byla nejvyšší hodnota  $THD_{U23} = 0,92\%$  a pro napětí  $U_{31}$  bylo maximum  $THD_{U31} = 1,31\%$ .



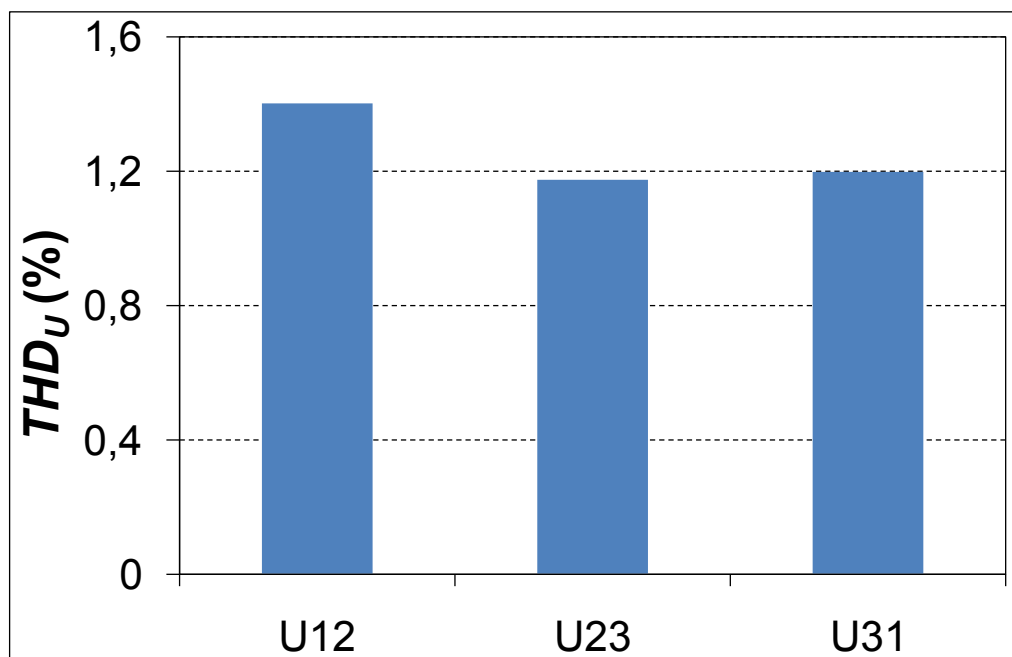
Obr. 5.6 Průběh zdánlivého výkonu a koeficientů celkového harmonického zkreslení v TT Velešín v roce 2009 po dobu měření

### 5.3.2 Vypočítané hodnoty 95-ti proc. percentilů $\rho_U$ a $THD_U$ pro rok 2009

Významnou charakteristikou kvality elektrické energie ve společném bodě napájení (PCC) je hodnota 95-ti procentního percentilu. Hodnot 95-ti procentních percentilů využívá pro hodnocení jednotlivých charakteristik kvality elektrické energie také norma ČSN EN 50160 (Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě).

V případě koeficientu napětíové nesymetrie vyšla výpočtem pro týdenní dobu měření hodnota 95-ti procentního percentilu rovna  $\rho_U = 0,2470\%$ . Tato hodnota dosahuje přibližně 12,5% maximální povolené hodnoty, definované normou ČSN EN 50160, která připouští hodnotu 95-ti procentního percentilu, vzešlou z týdenního měření ve výši 2%. Změřená hodnota koeficientu napětíové nesymetrie odpovídá dokonce i požadavkům PPDS-P3, která stanovuje nejvyšší hodnotu 95% percentilu ve výši 1,5%.

Pro koeficient celkového harmonického zkreslení jsou výsledné vypočítané hodnoty 95-ti procentního percentilu pro jednotlivá sdružená napětí rovny  $THD_{U12} = 1,4009\%$ ,  $THD_{U23} = 1,1748\%$ ,  $THD_{U31} = 1,1993\%$ . Výše zmíněné hodnoty jsou výhodné jak pro dodavatele elektrické energie, tak pro odběratele elektrické energie, tj. pro společnost SŽDC, a.s, neboť ani jedna z hodnot nepřesahuje maximální povolený limit, který v případě ČSN EN 50160 činí 8%. Dokonce ani v případě PPDS, P3 nebyly překročeny toleranční meze, které jsou pro hladinu 110 kV stanoveny na 2,5%. Grafické znázornění jednotlivých hodnot pro všechna tři sdružená napětí je zobrazeno na Obr. 5.7.



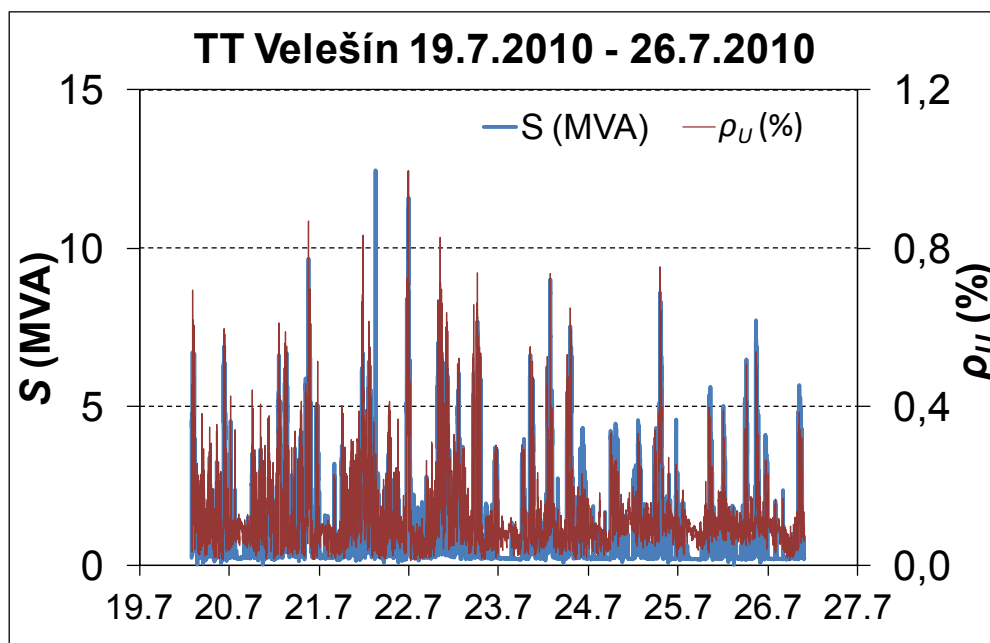
Obr. 5.7 Hodnoty 95-ti % percentilů koeficientů celkového harmonického zkreslení v TT Velešín v roce 2009

### 5.3.3 Naměřené hodnoty z trakční transformovny Velešín v roce 2010

V roce 2010 probíhalo měření od 19.7. do 26.7., a to na dvou měřicích stanovištích současně. První měřicí stanoviště bylo v trakční transformovně Velešín a druhé měřicí stanoviště bylo v nadřazené rozvodně 110 kV vodní elektrárny Lipno. Následující hodnoty a průběhy jsou vyhodnocením měření prvního měřicího stanoviště - trakční transformovny Velešín.

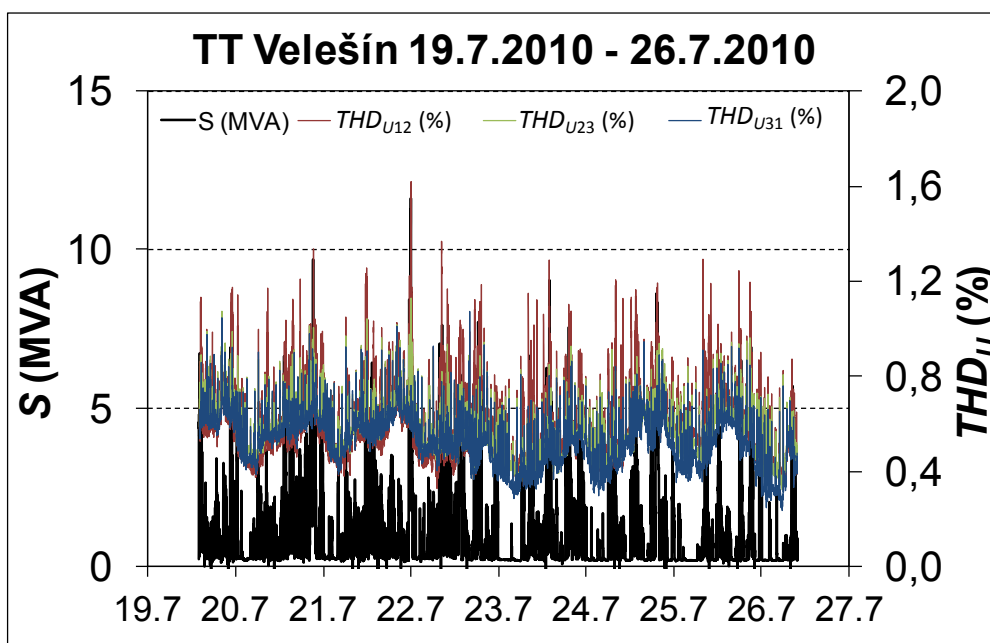
Průběh hodnot desetisekundových průměrů koeficientu napětěvé nesymetrie  $\rho_U$  v závislosti na čase je na Obr. 5.8. Průběh koeficientu napětěvé nesymetrie je opět dán do srovnání s průběhem odebíraného výkonu měřeného na primární straně trakčního transformátoru. Maximální hodnota odebíraného zdánlivého výkonu změřená na primární straně trakčního transformátoru dosáhla hodnoty 15,5 MVA. Nejvyšší hodnota koeficientu napětěvé nesymetrie má hodnotu 1,04 %.





Obr. 5.8 Průběh zdánlivého výkonu a koeficientu napěťové nesymetrie v TT Velešín v roce 2010 po dobu měření

Srovnání průběhu desetisekundových průměrů hodnot primárního výkonu s desetisekundovými průměry hodnot koeficientů celkového harmonického zkreslení  $THD_U$  všech tří sdružených napětí je na Obr. 5.9. Největší hodnota koeficientu celkového harmonického zkreslení pro napětí  $U_{12}$  byla  $THD_{U12} = 2,01\%$ , pro napětí  $U_{23}$  byla nejvyšší hodnota  $THD_{U23} = 1,69\%$  a pro napětí  $U_{31}$  bylo maximum  $THD_{U31} = 2,10\%$ .

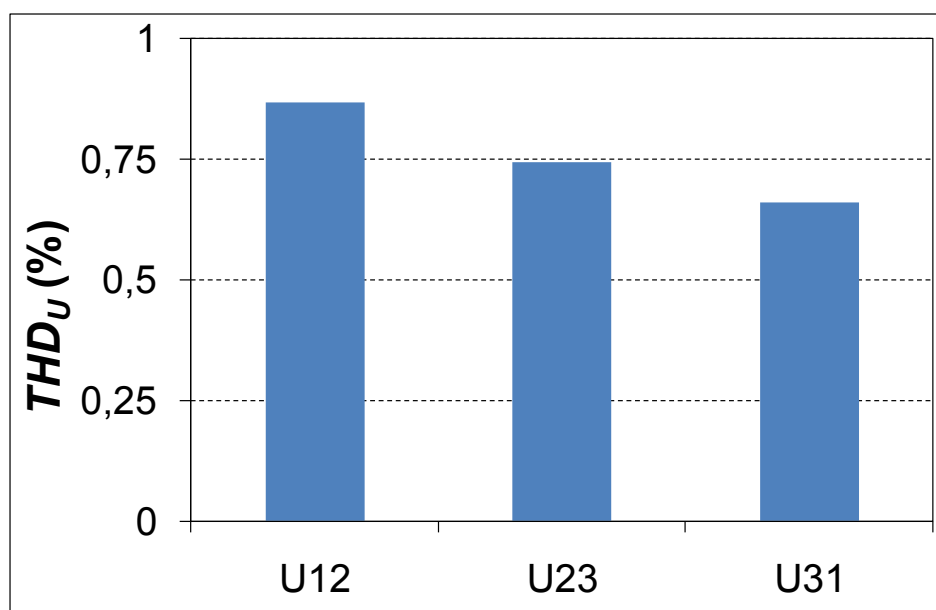


Obr. 5.9 Průběh zdánlivého výkonu a koeficientů celkového harmonického zkreslení v TT Velešín v roce 2010 po dobu měření

### 5.3.4 Vypočítané hodnoty 95-ti procentních percentilů $\rho_U$ a $THD_U$ pro rok 2010 (TT Velešín)

V případě měření v trakční transformovně v roce 2010 byla hodnota 95-ti procentního percentilu koeficientu napěťové nesymetrie pro týdenní dobu měření výpočtem stanovena  $\rho_U = 0,3437\%$ . Tato hodnota dosahuje přibližně 17% maximální povolené hodnoty, kterou norma ČSN EN 50160 připouští ve výši 2%. Zmíněná hodnota koeficientu napěťové nesymetrie opět odpovídá dokonce i požadavkům PPDS-P3, která stanovuje nejvyšší hodnotu 95% percentilu ve výši 1,5%.

Pro koeficient celkového harmonického zkreslení jsou výsledné vypočítané hodnoty 95-ti procentního percentilu pro jednotlivá sdružená napětí rovny  $THD_{U12} = 0,8672\%$ ,  $THD_{U23} = 0,7427\%$ ,  $THD_{U31} = 0,6617\%$ . Ani jedna z hodnot nepřesahuje maximální povolený limit, který v případě ČSN EN 50160 činí 8%. Dokonce ani v případě PPDS, P3 nebyly překročeny toleranční meze, které jsou pro hladinu 110 kV stanoveny na 2,5%, což je, jak již bylo řečeno, výhodné jak pro dodavatele elektrické energie, tak i pro odběratele elektrické energie, tj. pro společnost SŽDC, s.o. Grafické znázornění jednotlivých hodnot pro všechna tři sdružená napětí je na Obr. 5.10.

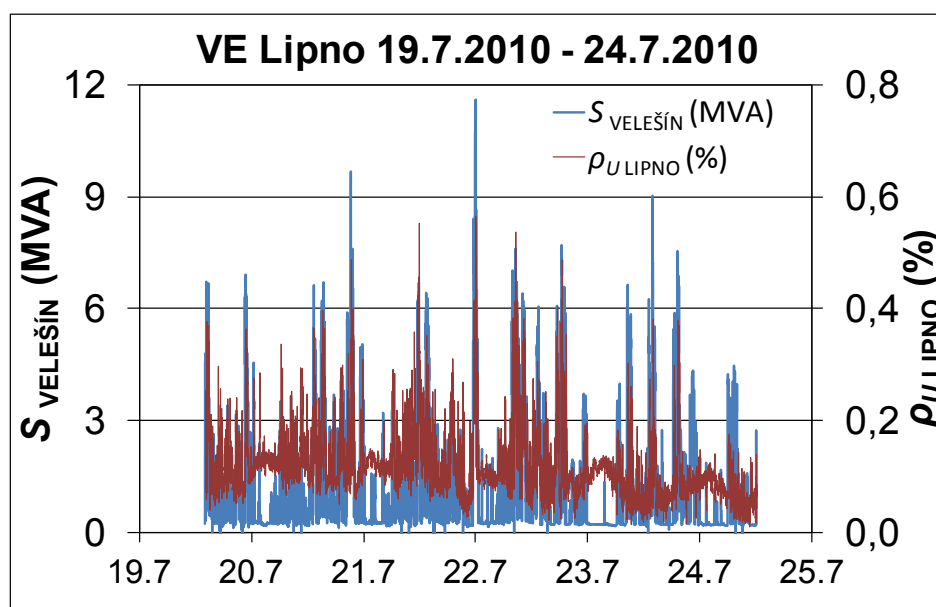


Obr. 5.10 Hodnoty 95-ti % percentilů koeficientů celkového harmonického zkreslení v TT Velešín v roce 2010

### 5.3.5 Naměřené hodnoty z rozvodny 110 kV VE Lipno v roce 2010

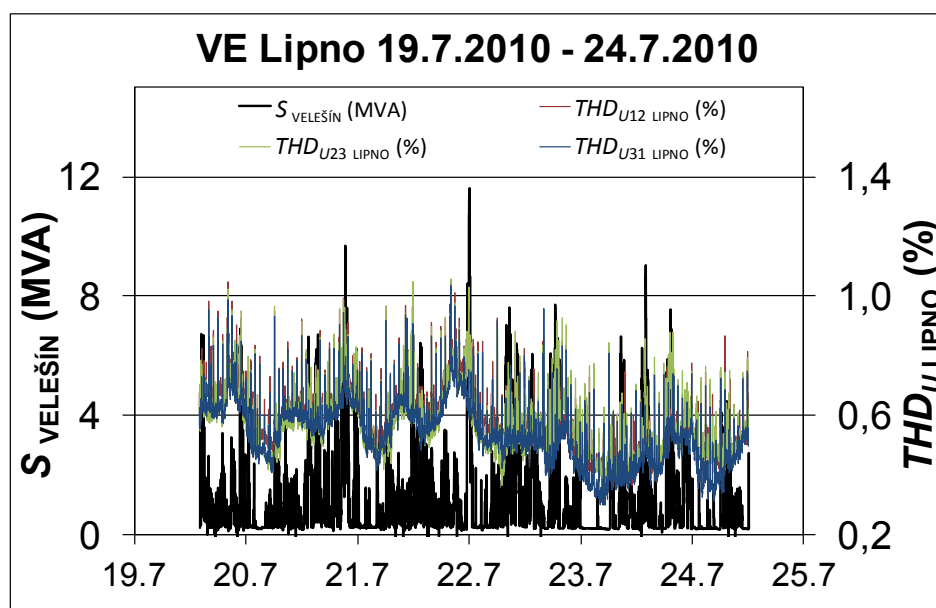
Druhé měřicí stanoviště, ve kterém probíhalo měření v roce 2010, bylo umístěno v rozvodně 110 kV vodní elektrárny Lipno. Na tomto měřicím stanovišti byla z technických důvodů doba měření zkrácena na pět dní. Nebyl tedy plně dodržen požadavek normy ČSN EN 50160 na dobu měření sedmi po sobě jdoucích dní. Měření probíhalo od 19.7. do 24.7. Průběh hodnot desetisekundových průměrů koeficientu napěťové nesymetrie  $\rho_U$  v závislosti na čase je na Obr. 5.11. Srovnáván byl průběh koeficientu napěťové nesymetrie měřený v rozvodně VE Lipno s průběhem odpovídajícího

odebíraného zdánlivého výkonu měřeného v TT Velešín. Nejvyšší hodnota koeficientu napětové nesymetrie má hodnotu 0,62 %.



Obr. 5.11 Průběh zdánlivého výkonu v TT Velešín a koeficientu napětové nesymetrie v rozvodně 110kV VE Lipno v roce 2010 po dobu měření

Srovnání průběhu desetisekundových průměrů hodnot primárního výkonu s desetisekundovými průměry hodnot koeficientů celkového harmonického zkreslení  $THD_U$  všech tří sdružených napětí je na Obr. 5.12. Pro napětí  $U_{12}$  byla nejvyšší hodnota koeficientu celkového harmonického zkreslení  $THD_{U_{12}} = 1,72\%$ , pro napětí  $U_{23}$  byla nejvyšší hodnota  $THD_{U_{23}} = 1,73\%$  a pro napětí  $U_{31}$  bylo maximum  $THD_{U_{31}} = 1,77\%$ .

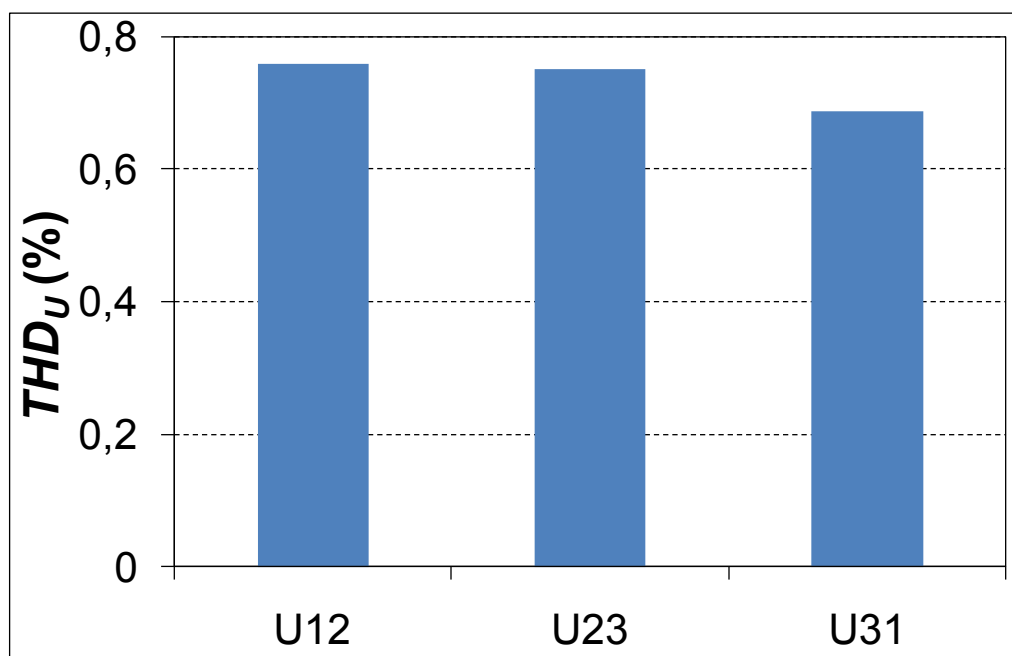


Obr. 5.12 Průběh zdánlivého výkonu v TT Velešín a koeficientů celkového harmonického zkreslení v rozvodně 110kV VE Lipno v roce 2010 po dobu měření

### 5.3.6 Vypočítané hodnoty 95-ti procentních percentilů $\rho_U$ a $THD_U$ pro rok 2010 (VE Lipno)

V případě měření v rozvodně 110 kV VE Lipno v roce 2010 byla hodnota 95-ti procentního percentilu koeficientu napěťové nesymetrie pro týdenní dobu měření výpočtem stanovena  $\rho_U = 0,2256\%$ . Tato hodnota dosahuje přibližně 17% maximální povolené hodnoty, kterou norma ČSN EN 50160 připouští ve výši 2%. Změřená hodnota koeficientu napěťové nesymetrie odpovídá i požadavkům PPDS-P3, která stanovuje nejvyšší hodnotu 95% percentilu ve výši 1,5%.

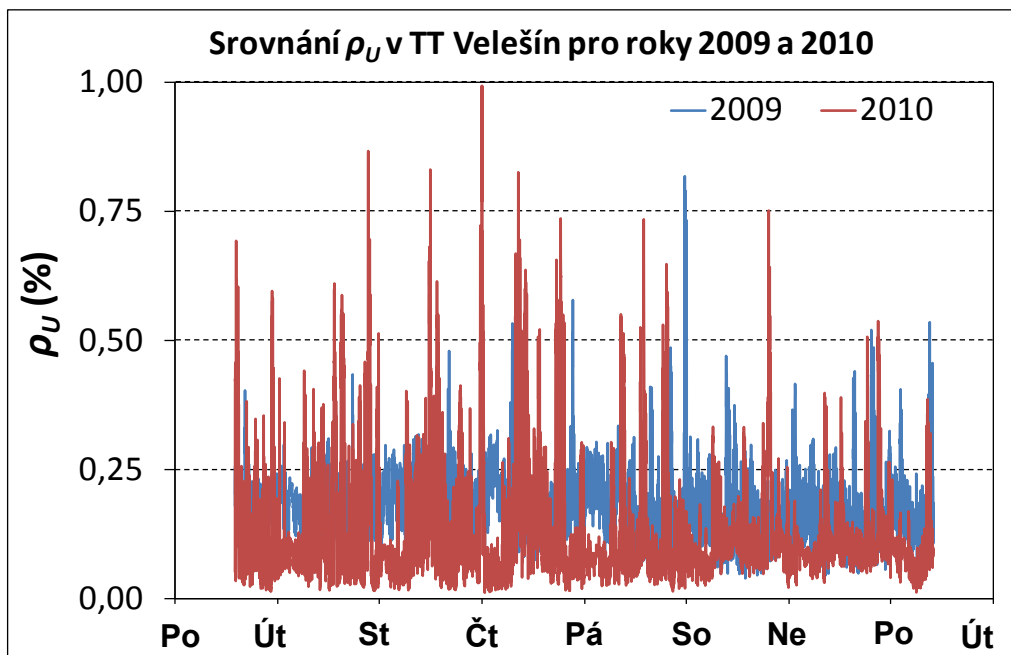
Pro koeficient celkového harmonického zkreslení jsou výsledné vypočítané hodnoty 95-ti procentního percentilu pro jednotlivá sdružená napětí rovny  $THD_{U12} = 0,7590\%$ ,  $THD_{U23} = 0,7508\%$ ,  $THD_{U31} = 0,6866\%$ . Ani v tomto případě nebyly překročeny toleranční meze PPDS-P3, které jsou pro hladinu 110 kV stanoveny na 2,5%. Grafické znázornění jednotlivých hodnot pro všechna tři sdružená napětí je na Obr. 5.13.



Obr. 5.13 Hodnoty 95-ti % percentilů koeficientů celkového harmonického zkreslení v rozvodně 110 kV VE Lipno v roce 2010

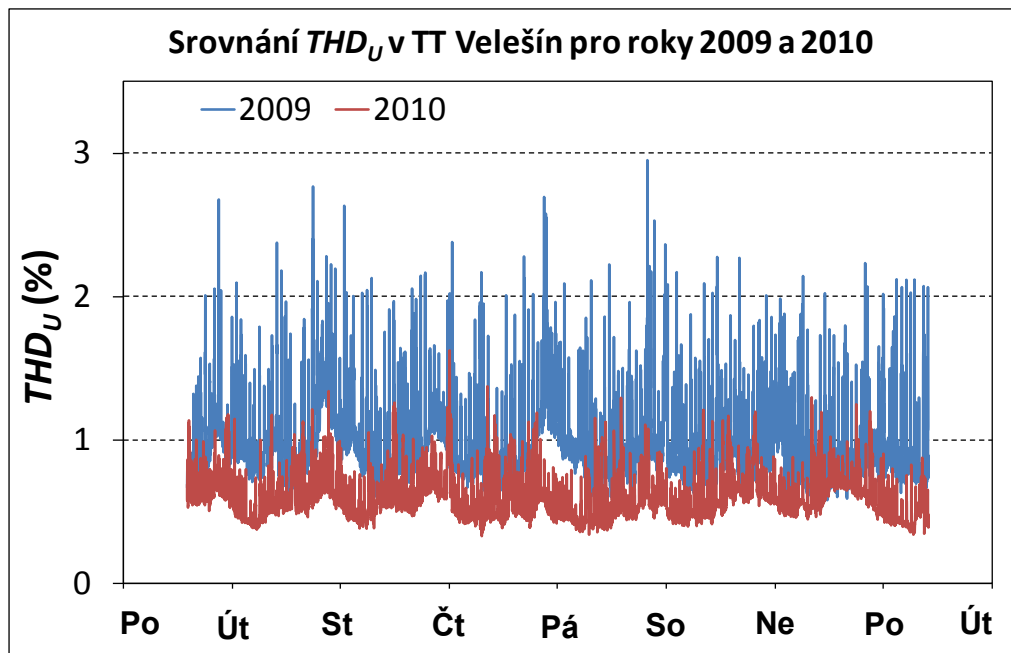
### 5.3.7 Srovnání naměřených hodnot z TT Velešín v letech 2009 a 2010

Pro srovnání výsledků měření z roku 2009 a 2010 byly vybrány příslušné odpovídající intervaly měření. V roce 2009 měření probíhalo od 13.7. do 20.7. a v roce 2010 od 19.7. do 24.7. Pro grafické znázornění byly zvoleny desetisekundové průměry. Průběh srovnání koeficientů napěťové nesymetrie  $\rho_U$  v závislosti na čase je na Obr. 5.14.



Obr. 5.14 Srovnání průběhů koeficientů napěťové nesymetrie v TT Velešín pro roky 2009 a 2010

Při srovnávání průběhů hodnot koeficientů celkového harmonického zkreslení  $THD_U$  byla brána v potaz pouze ta sdružená napětí, na která byl připojen trakční odběr, tj. v obou dvou případech jde o napětí  $U_{12}$ . Výše zmíněné srovnání je na Obr. 5.15.

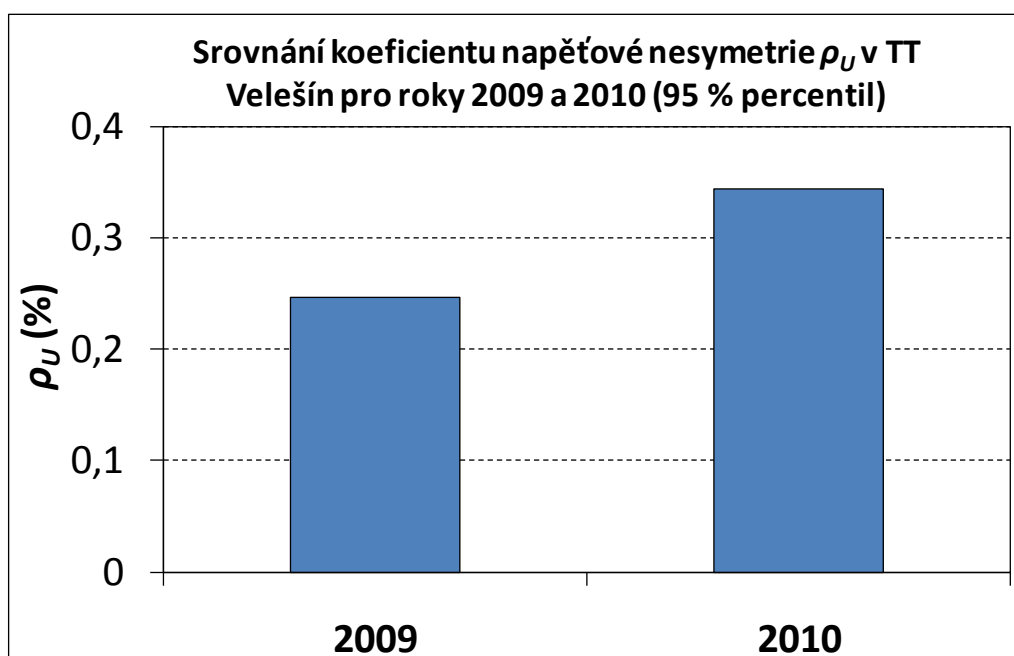


Obr. 5.15 Srovnání průběhů koeficientů celkového harmonického zkreslení v TT Velešín pro roky 2009 a 2010

Přestože jsou logicky průběhy jak koeficientu napěťové nesymetrie  $\rho$ , tak koeficientu celkového harmonického zkreslení  $THD_U$  měřené v TT Velešín v letech 2009 a 2010 rozdílné, projevuje se v obou průbězích shoda v denním průběhu zatížení (oba dva výše zmíněné koeficienty jsou přímo úměrné zatížení). Tato shoda je pak viditelná především v průběhu koeficientu celkového harmonického zkreslení  $THD_U$ .

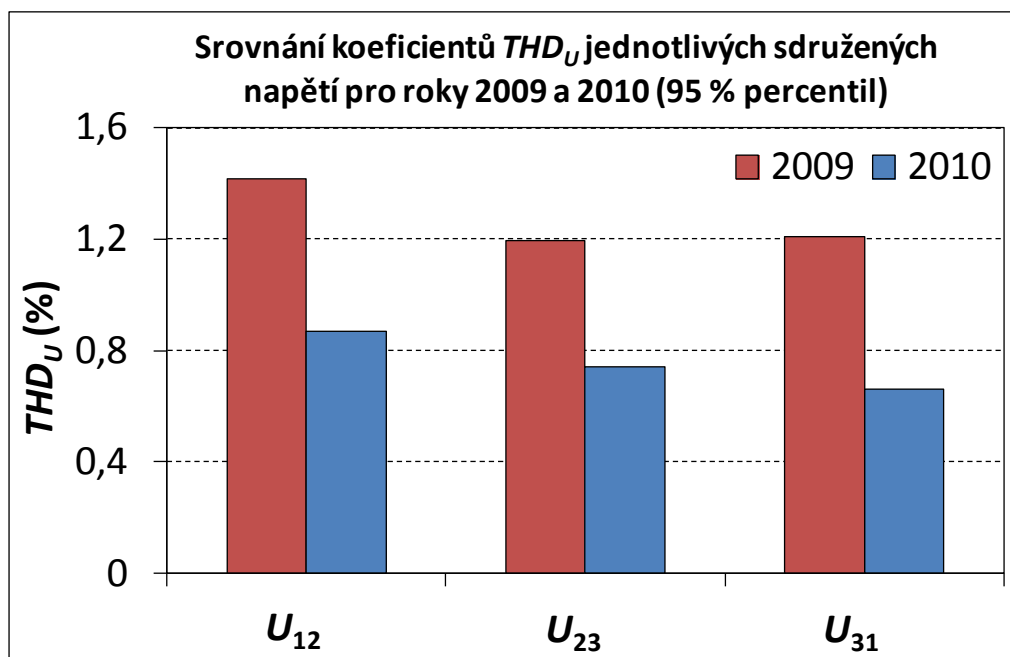
#### 5.4 Srovnání hodnot 95-ti procentních percentilů $\rho_U$ a $THD_U$ (TT Velešín 2009-2010)

Srovnáme-li hodnoty 95-ti procentních percentilů koeficientu napěťové nesymetrie změřené v roce 2009 a 2010, dojdeme k následujícím zjištěním. Zatímco v roce 2009 byla výpočtem stanovena hodnota  $\rho_U = 0,2470 \%$ , v roce následujícím byla spočítána hodnota koeficientu napěťové nesymetrie  $\rho_U = 0,3437 \%$ , což představuje nárůst o necelých 40%. Hodnoty koeficientů napěťové nesymetrie změřené v jednotlivých letech jsou na Obr. 5.16.



Obr. 5.16 Srovnání 95-ti % percentilů koeficientů napěťové nesymetrie v TT Velešín pro roky 2009 a 2010

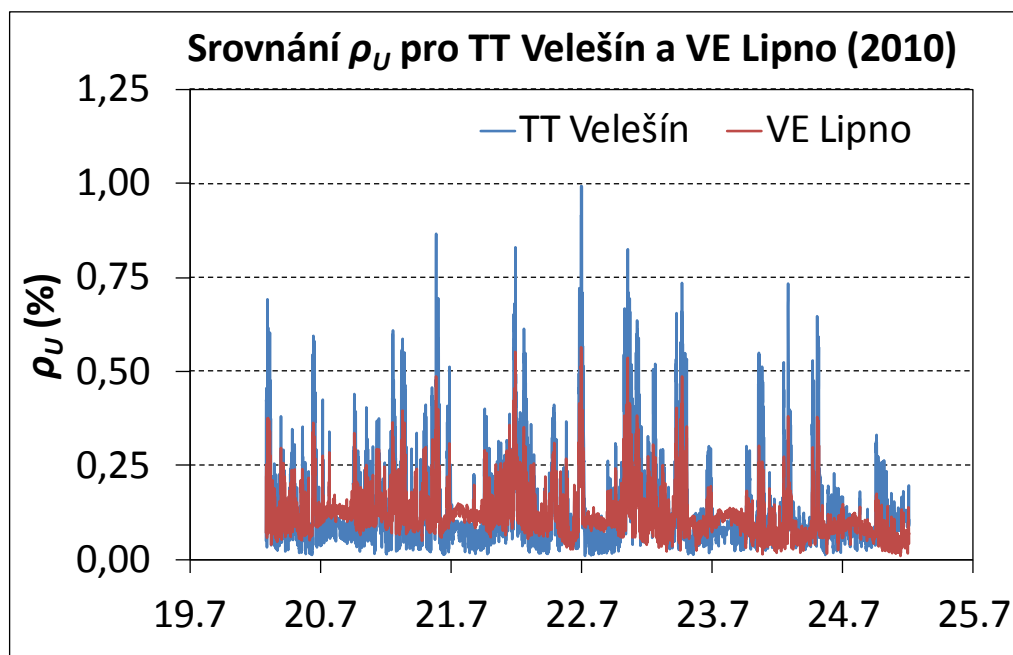
Opačný trend můžeme sledovat v případě koeficientu činitele celkového harmonického zkreslení  $THD_U$ . Hodnota koeficientu  $THD_U$  sdruženého napětí  $U_{12}$ , kterým byl napájen trakční transformátor, poklesla z hodnoty 1,4176 % na hodnotu 0,8672%, což představuje pokles o necelých 62%. U ostatních sdružených napětí došlo také k meziročnímu poklesu a situace byla následující:  $THD_{U_{23}}$  poklesl z 1,1748% na 0,7427% (pokles o 63%) a  $THD_{U_{31}}$  poklesl z hodnoty 1,1993% na hodnotu 0,6617% (pokles o 55%). Grafický přehled výše zmíněných dat můžeme vidět na Obr. 5.17.



Obr. 5.17 Srovnání 95-ti % percentilů koeficientů celkového harmonického zkreslení v TT Velešín pro roky 2009 a 2010

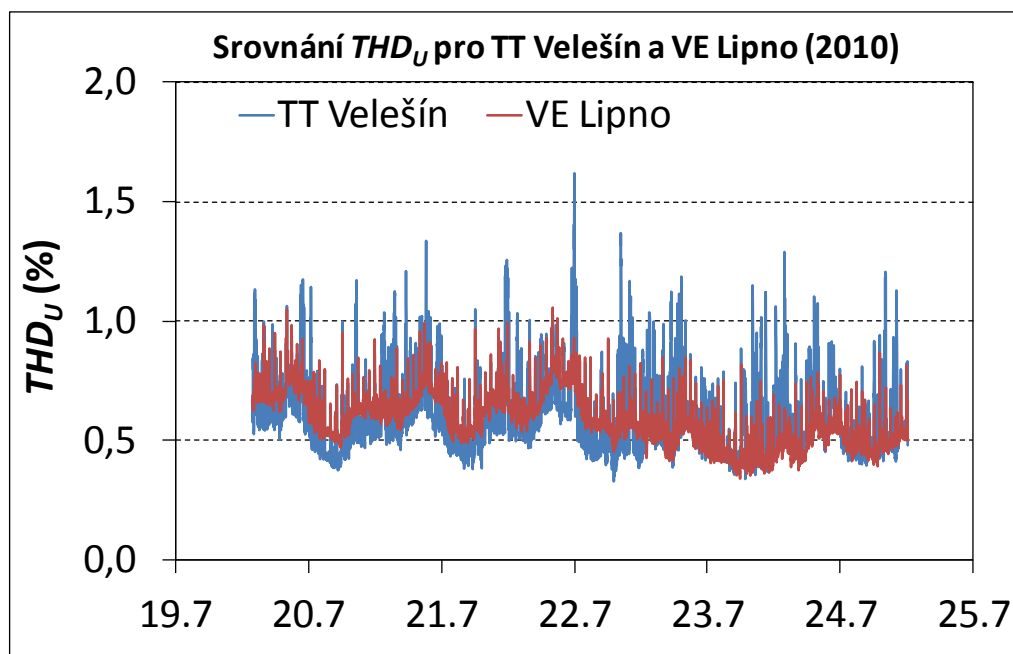
## 5.5 Srovnání naměřených hodnot z TT Velešín a VE Lipno v 2010

Jelikož bylo v roce 2010 měřeno na dvou místech současně, nabízí se možnost provést srovnání těchto naměřených dat. Pro srovnání výsledků měření z TT Velešín a VE Lipno z roku 2010 byly vybrány příslušné odpovídající intervaly měření. V tomto případě byl použit pouze pětidenní měřicí interval, jelikož v rozvodně VE Lipno byl měřicí interval z technických důvodů zkrácen na pět dní. Srovnávány tedy byly výsledky měření, které probíhalo od 19.7. do 24.7. Pro grafické znázornění byly opět zvoleny desetisekundové průměry. Průběh srovnání hodnot koeficientů napěťové nesymetrie  $\rho_U$  v závislosti na čase je na Obr. 5.18.



Obr. 5.18 Srovnání průběhů koeficientů napěťové nesymetrie v TT Velešín a VE Lipno v roce 2010

Při srovnávání průběhů hodnot koeficientů celkového harmonického zkreslení  $THD_U$  byla brána v potaz pouze ta sdružená napětí, na která byl připojen trakční odběr, tj. v obou dvou případech jde o napětí  $U_{12}$ . Výše zmíněné srovnání je na Obr. 5.19.

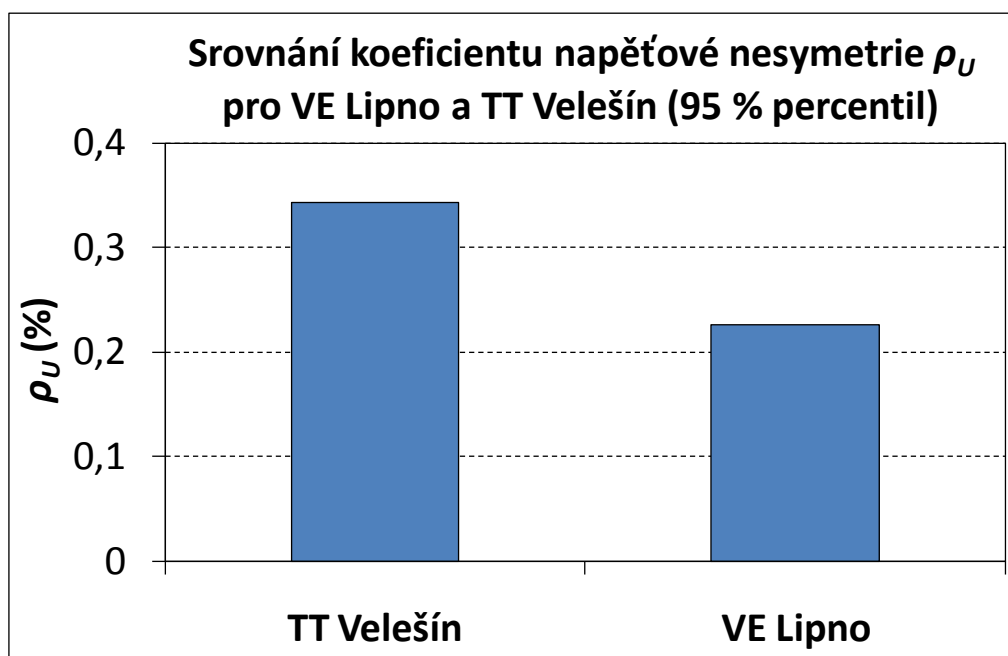


Obr. 5.19 průběhů koeficientů celkového harmonického zkreslení v TT Velešín a VE Lipno v roce 2010



## 5.6 Srovnání hodnot 95-ti procentních percentilů $\rho_U$ a $THD_U$ pro rok 2010 (TT Velešín a VE Lipno)

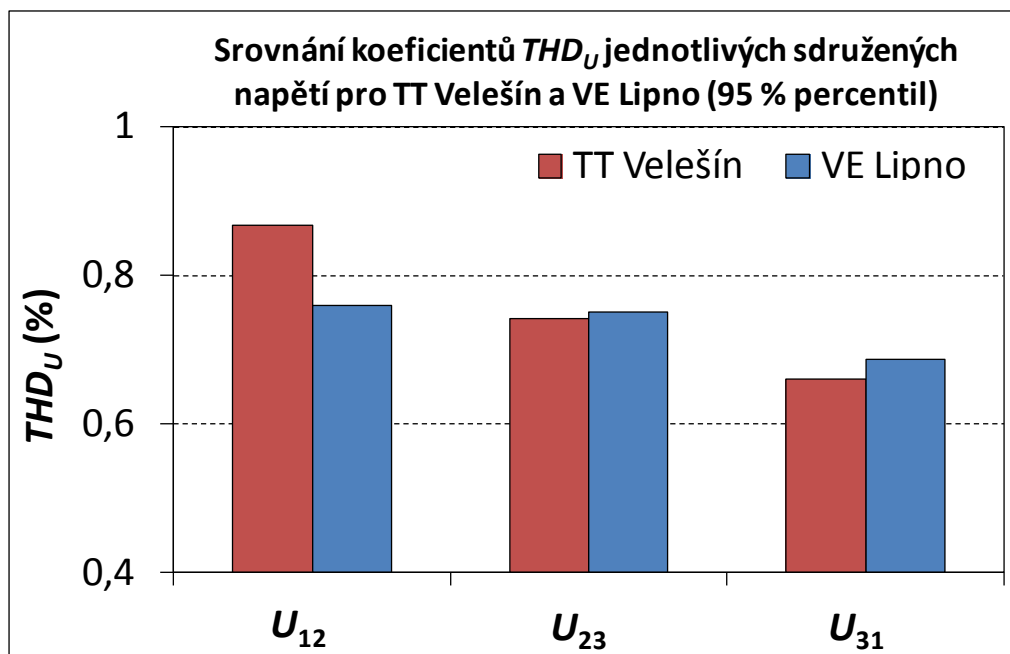
Ze srovnání hodnot 95-ti procentních percentilů koeficientů napěťové nesymetrie změřených v roce 2010 v trakční transformovně Velešín a rozvodně 110 kV vodní elektrárny Lipno můžeme vyvodit následující zjištění: v trakční transformovně Velešín byla výpočtem stanovena hodnota  $\rho_U = 0,3437 \%$ . V nadřazené rozvodně 110 kV vodní elektrárny Lipno byla spočítána hodnota koeficientu napěťové nesymetrie  $\rho_U = 0,2256 \%$ , což představuje pokles o necelých 35% směrem od VE Lipno. Tyto hodnoty jasně potvrzují předpoklad, že velikost koeficientu napěťové nesymetrie klesá od místa vzniku směrem ke zdroji napětí. Na třiceti pěti kilometrech vedení VVN 110 kV tedy došlo k útlumu o velikosti přibližně 35%. Hodnoty koeficientů napěťové nesymetrie pro jednotlivá měřicí stanoviště jsou na Obr. 5.20.



Obr. 5.20 Srovnání 95-ti % percentilů koeficientů napěťové nesymetrie v TT Velešín a VE Lipno v roce 2010

Obdobný trend můžeme pozorovat i v případě koeficientu činitele celkového harmonického zkreslení  $THD_U$ . Víme, že zátěž byla připojena na sdružené napětí  $U_{12}$ . Vypovídající hodnotu tedy mají právě jen koeficienty  $THD_U$  pro napětí  $U_{12}$ . Pro názornost jsou však uváděny i hodnoty  $THD_U$  pro ostatní sdružená napětí. Skutečnost, že trakční odběr byl připojen na sdružené napětí  $U_{12}$  potvrzují i změřené hodnoty, ze kterých je zřejmé, že velikost koeficientu  $THD_U$  je pro sdružené napětí  $U_{12}$  největší. A to jak v případě TT Velešín ( $THD_{U_{12}} = 0,8672$ ;  $THD_{U_{23}} = 0,7427$ ;  $THD_{U_{31}} = 0,6617$ ), tak i v případě VE Lipno ( $THD_{U_{12}} = 0,7590$ ;  $THD_{U_{23}} = 0,7508$ ;  $THD_{U_{31}} = 0,6866$ ). Ze změřených hodnot dále vyplývá, že dle teoretických předpokladů dochází na vedení VVN 110 kV k útlumu činitele celkového harmonického zkreslení. Na vedení o délce přibližně třiceti pěti kilometrů došlo k útlumu o přibližně 12,5%. Oproti koeficientu napěťové nesymetrie je pokles méně než poloviční. Dle výše uvedených skutečností je možno usuzovat, že hodnota harmonického zkreslení v rozvodně VE Lipno je patrně

ovlivňována dalšími odběry připojenými k této rozvodně více, než velikost napěťové nesymetrie. Toto potvrzuje i srovnání okamžitých průběhů hodnot  $THD_U$  a  $\rho_U$  z jednotlivých měřicích stanovišť. Z těchto srovnání je patrné, že průběhy koeficientu napěťové nesymetrie spolu více korelují oproti průběhům koeficientů celkového harmonického zkreslení, které vykazují určitou odlišnost. Grafický přehled hodnot 95-ti procentních percentilů koeficientu  $THD_U$  v jednotlivých fázích pro obě měřicí stanoviště můžeme vidět na Obr. 5.21.



Obr. 5.21 Srovnání 95-ti % percentilů koeficientů celkového harmonického zkreslení v TT Velešín a VE Lipno v roce 2010

## 6 Statistická analýza

Pro získání základních informací o měřených datech v datovém souboru jsem užil statistický popis. Pro potřeby mé práce to jsou popisné statistiky ve formě tabulek, histogramů a krabicových grafů.

### 6.1 Statistické charakteristiky - popisná statistika

*Aritmetický průměr:*

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (23)$$

*Modus  $\hat{x}$ :* Je definován jako nejčtenější varianta proměnné

*Dolní kvartil  $x_{0,25}$ :* Rozděluje datový soubor tak, že 25% hodnot je menších než tento kvartil a zbytek, tj. 75% větších (nebo rovných)

*Medián  $x_{0,5}$ :* Rozděluje datový soubor tak, že polovina (50%) hodnot je menších než medián a polovina (50%) hodnot větších (nebo rovných)

*Horní kvartil  $x_{0,75}$ :* Rozděluje datový soubor tak, že 75% hodnot je menších než tento kvartil a zbytek, tj. 25% větších (nebo rovných)

*Interkvartilové rozpětí:*

$$IQR = x_{0,75} - x_{0,25} \quad (24)$$

*Výběrový rozptyl:*

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (25)$$

*Výběrová směrodatná odchylka:*

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (26)$$

*Výběrová šikmost (skewness):*

$$\alpha = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{s^3} \quad (27)$$

$\alpha = 0$	Hodnoty proměnné jsou kolem jejího průměru rozloženy symetricky
$\alpha > 0$	U proměnné převažují hodnoty menší než průměr
$\alpha < 0$	U proměnné převažují hodnoty větší než průměr

$$\text{Výběrová špičatost (kurtosis): } \beta = \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{s^4} - 3 \frac{(n-1)^2}{(n-2)(n-3)} \quad (28)$$

$\beta = 0$	Špičatost odpovídá normálnímu rozdělení
$\beta > 0$	Špičaté rozdělení proměnné
$\beta < 0$	Ploché rozdělení proměnné

[26]

V níže uvedených tabulkách jsou uvedeny hodnoty základní popisné statistiky získané pomocí MS Excel, a to v následujícím pořadí: měření v trakční transformovně v roce 2009, měření v trakční transformovně Velešín v roce 2010, měření v rozvodně vodní elektrárny Lipno v roce 2010

Tab. 6.1: Popisná statistika primárních sdružených napětí a sekundárního napětí z TT Velešín v roce 2010

	$U_{12}$ (V)	$U_{23}$ (V)	$U_{31}$ (V)	$U_s$ (V)
Stř. hodnota	115352,2	115291,7	115406,3	27125,2
Chyba stř. hodnoty	3,1334	3,2665	2,8689	0,8112
Medián	115451,7	115363,2	115451,5	27153,3
Modus	115200,3	115693,8	115196,6	27223,4
Směr. odchylka	761,25	793,58	696,99	197,07
Rozptyl výběru	579495,2	629768,9	485790,7	38836,9
Špičatost	1,0488	0,9657	0,8598	2,8518
Šikmost	-0,8883	-0,8241	-0,7217	-1,2159
Rozdíl max-min	4934,9	5076,0	4167,4	1846,1
Minimum	112056,1	111967,9	112873,9	25676,7
Maximum	116991,0	117043,9	117041,3	27522,8
Počet	59021	59021	59021	59021

Tab. 6.2: Popisná statistika koeficientu napěťové nesymetrie  $\rho_U$  a činitelů harmonického zkreslení  $THD_U$  primárních sdružených napětí z TT Velešín v roce 2010

	$\rho_U$ (%)	$THD_{U_{12}}$ (%)	$THD_{U_{23}}$ (%)	$THD_{U_{31}}$ (%)	$THD_{U_s}$ (%)
Stř. hodnota	0,1288	0,6022	0,5705	0,5228	1,7466
Chyba stř. hodnoty	0,000482	0,000693	0,000497	0,000482	0,004060
Medián	0,0916	0,56	0,56	0,52	1,31
Modus	0,0819	0,47	0,49	0,54	1,26
Směr. odchylka	0,1172	0,1684	0,1207	0,1171	0,9865
Rozptyl výběru	0,0137	0,0283	0,0146	0,0137	0,9731
Špičatost	7,7899	2,3168	3,1025	4,6365	5,3954
Šikmost	2,4678	1,3650	1,1274	1,0050	2,1642
Rozdíl max-min	1,0420	1,72	1,38	1,87	9,56
Minimum	0,0007	0,29	0,31	0,23	0,59
Maximum	1,0427	2,01	1,69	2,10	10,15
Počet	59021	59021	59021	59021	59021

Tab. 6.3: Popisná statistika sdružených napětí rozvodny 110 kV vodní elektrárny Lipno v roce 2010

	$U_{12}$ (V)	$U_{23}$ (V)	$U_{31}$ (V)
Stř. hodnota	113692,6	113588,6	113755,8
Chyba stř. hodnoty	4,7789	4,6391	4,3692
Medián	113917,7	113817,1	113931,7
Modus	114031,1	113951,1	113958,2
Směr. odchylka	985,75	956,92	901,23
Rozptyl výběru	971701,9	915686,7	812219,1
Špičatost	0,6009	0,7862	0,7971
Šikmost	-0,9582	-1,0361	-1,0209
Rozdíl max-min	5269,6	5138,0	4670,1
Minimum	110311,8	110259,1	110840,3
Maximum	115581,4	115397,1	115510,4
Počet	42548	42548	42548

Tab. 6.4: Popisná statistika koeficientu napěťové nesymetrie  $\rho_U$  a činitelů harmonického zkreslení  $THD_U$  sdružených napětí z VE Lipno v roce 2010

	$\rho_U$ (%)	$THD_{U12}$ (%)	$THD_{U23}$ (%)	$THD_{U31}$ (%)
Stř. hodnota	0,1188	0,5814	0,5728	0,5363
Chyba stř. hodnoty	0,000331	0,000579	0,000558	0,000549
Medián	0,1039	0,5700	0,5600	0,5300
Modus	0,0946	0,5500	0,4900	0,5100
Směr. odchylka	0,0683	0,1194	0,1150	0,1131
Rozptyl výběru	0,0047	0,0142	0,0132	0,0128
Špičatost	5,6370	2,2019	3,6401	4,1114
Šikmost	1,9375	0,8842	1,2888	1,0191
Rozdíl max-min	0,6155	1,40	1,40	1,49
Minimum	0,0007	0,32	0,33	0,28
Maximum	0,6161	1,72	1,73	1,77
Počet	42548	42548	42548	42548

Tab. 6.5: Popisná statistika primárních sdruž. napětí a sekundárního napětí z TT Velešín v roce 2009

	$U_{12}$ (V)	$U_{23}$ (V)	$U_{31}$ (V)	$U_S$ (V)
Stř. hodnota	116229,3	116284,0	116453,4	27049,6
Chyba stř. hodnoty	2,2037	2,2790	2,1796	6,2699
Medián	116123,0	116155,7	116384,1	27123,3
Modus	116036,6	115995,7	116282,6	27103,4
Směr. odchylka	540,01	558,44	534,10	1536,40
Rozptyl výběru	291611,9	311860,8	285260,2	2360517,3
Špičatost	0,3228	-0,0069	0,3968	296,7126
Šikmost	0,4615	0,5529	0,3371	-17,1932
Rozdíl max-min	4193,9	4045,6	4015,8	27339,9
Minimum	113937,0	113947,7	114314,7	261,2
Maximum	118130,9	117993,3	118330,5	27601,1
Počet	60046	60046	60046	60046

Tab. 6.6: Popisná statistika koeficientu napětové nesymetrie  $\rho_U$  a činitelů harmonického zkreslení  $THD_U$  primárních sdružených napětí z TT Velešín v roce 2009

	$\rho_U$ (%)	$THD_{U12}$ (%)	$THD_{U23}$ (%)	$THD_{U31}$ (%)	$THD_{Us}$ (%)
Stř. hodnota	0,1679	0,9739	0,8486	0,9053	2,9294
Chyba stř. hodnoty	0,000333	0,001658	0,00149	0,001466	0,007243
Medián	0,1557	0,9024	0,7952	0,8522	2,2304
Modus	0,1044	0,8857	0,8400	0,8508	2,2752
Směr. odchylka	0,0816	0,4062	0,3652	0,3592	1,7748
Rozptyl výběru	0,0067	0,1650	0,1334	0,1290	3,1498
Špičatost	8,2244	41,0010	58,5812	61,3963	5,9878
Šikmost	2,1106	5,4403	6,8188	6,9741	2,3625
Rozdíl max-min	1,0848	5,4031	5,7890	5,3807	21,2358
Minimum	0,0006	0,4004	0,3618	0,3727	1,1528
Maximum	1,0853	5,8035	6,1508	5,7533	22,3886
Počet	60046	60046	60046	60046	60046

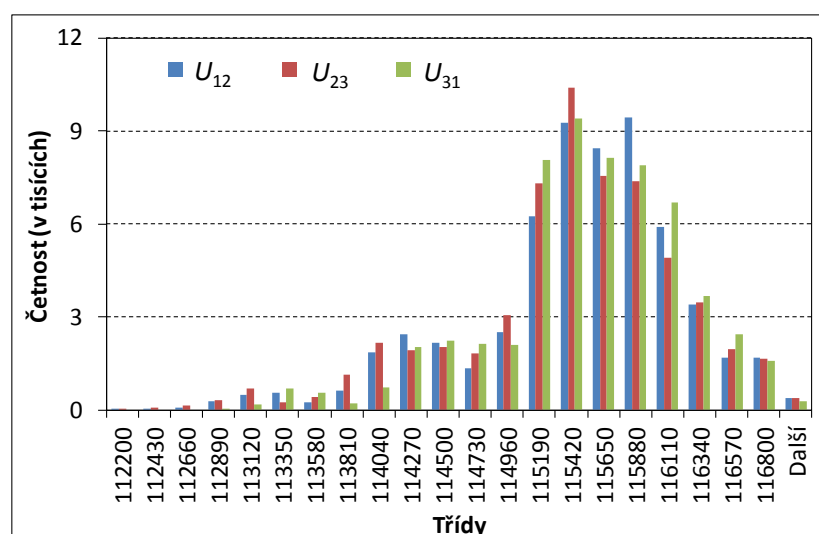
Tab. 6.7: Popisná statistika zdánlivých výkonů na sekundární straně TT Velešín v letech 2009,2010 a zdánlivého výkonu zatíženého sdruž. napětí v rozvodně 110 kV VE Lipno v roce 2010

	TT Velešín 2010	VE Lipno 2010	TT Velešín 2009
Stř. hodnota	1104606,6	1559991,4	913243,0
Chyba stř. hodnoty	6371,26	4476,80	4528,78
Medián	343499,3	1357999,3	404706,3
Modus	203413,5	998532,0	188357,8
Směr. odchylka	1547849,1	923436,9	1109744,6
Rozptyl výběru	$2,40 \cdot 10^{12}$	$8,53 \cdot 10^{12}$	$1,23 \cdot 10^{12}$
Špičatost	123,3116	1,2393	8,6201
Šikmost	-0,2998	1,0758	2,6849
Rozdíl max-min	93862574,2	11096035,2	10258964,0
Minimum	-78356601,9	7204,9	1722,3
Maximum	15505972,2	11103240,2	10260686,3
Počet	59021	42548	60046

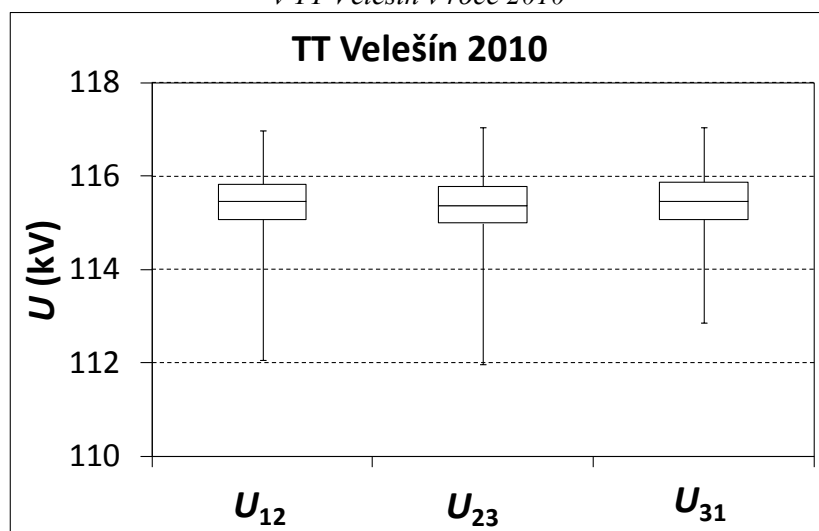
## 6.2 Histogramy a krabicové grafy

Histogram, jako snadno pochopitelný způsob grafického popisu rozložení dat daného datového souboru, poskytuje informace o hodnocení četnosti výskytu zvolených měřených a počítaných veličin spadajících do stanovených tříd četnosti. Je ovšem závislý na volbě velikosti tříd četnosti. Alternativní způsob zobrazení, který není závislý na velikosti tříd četnosti, je krabicový graf. Na rozdíl od histogramu, který graficky zobrazuje třídy stejné délky s různou četností, je krabicový graf zobrazením tříd různé délky se stejnou četností. V praxi jde o znázornění pěti hodnot: minima, dolního kvartilu, mediánu, horního kvartilu a maxima.

Histogramy i krabicové grafy jsem vytvořil pro stejné veličiny a pro stejné období jako popisnou statistiku, tj. pro TT Velešín v roce 2010: primární sdružená a jednofázové sekundární napětí trakčního transformátoru, koeficienty celkového harmonického zkreslení výše zmíněných napětí, a koeficient napětové nesymetrie; pro VE Lipno v roce 2010: sdružená napětí vedení 110 kV z TT Velešín, koeficienty celkového harmonického zkreslení výše zmíněných napětí, a koeficient napětové nesymetrie; pro TT Velešín v roce 2009: primární sdružená a jednofázové sekundární napětí trakčního transformátoru, koeficienty celkového harmonického zkreslení výše zmíněných napětí, a koeficient napětové nesymetrie. Vždy je uveden daný histogram a k němu odpovídající krabicový graf. Zdrojová data každého histogramu jsou uvedena v příloze. Pro třířázová napětí a jejich příslušné koeficienty harmonického zkreslení jsou uvedeny hodnoty všech tří fází v jednom společném grafu. Histogramy i krabicové grafy jednotlivých fází třířázových veličin v samostatných grafech včetně kumulativních četností u histogramů jsou uvedeny v příloze.

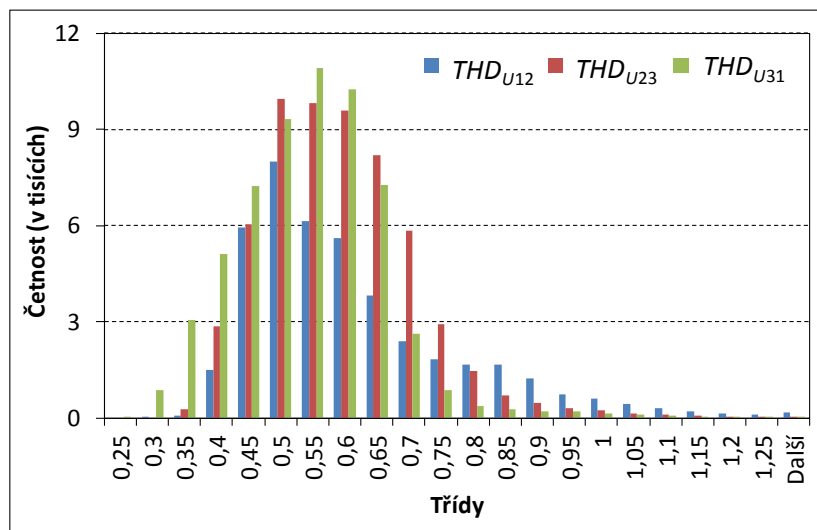


Obr. 6.1 Histogram efektivních hodnot sdružených napětí primární strany trakčního transformátoru v TT Velešín v roce 2010

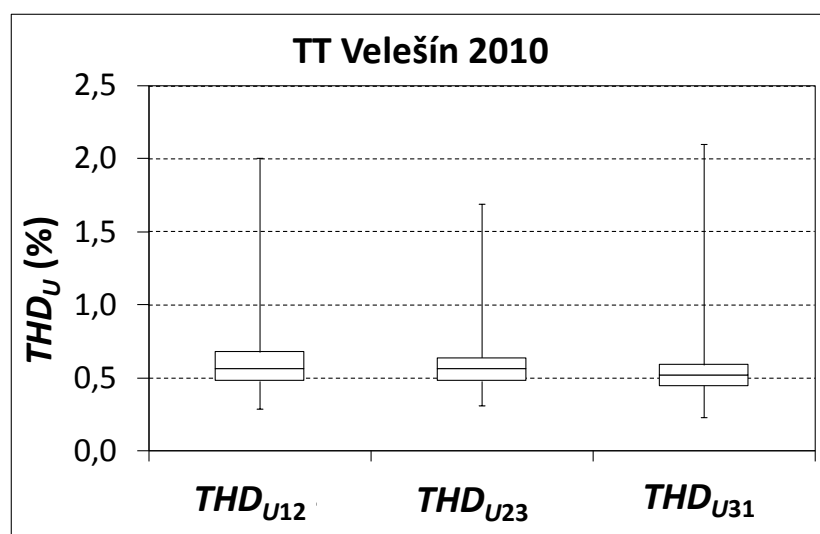


Obr. 6.2 Krabicový graf efektivních hodnot sdružených napětí primární strany trakčního transformátoru v TT Velešín v roce 2010

Z výše uvedených dvou grafů je patrné, že v době měření v TT Velešín v roce 2010 se medián efektivních hodnot primárních sdružených napětí trakčního transformátoru pohyboval okolo hodnoty 115 kV. Výběrová šikmost je pro všechna tři napětí  $<0$ , u proměnné tedy převažují hodnoty větší než průměr (viz. Tab. 6.1).



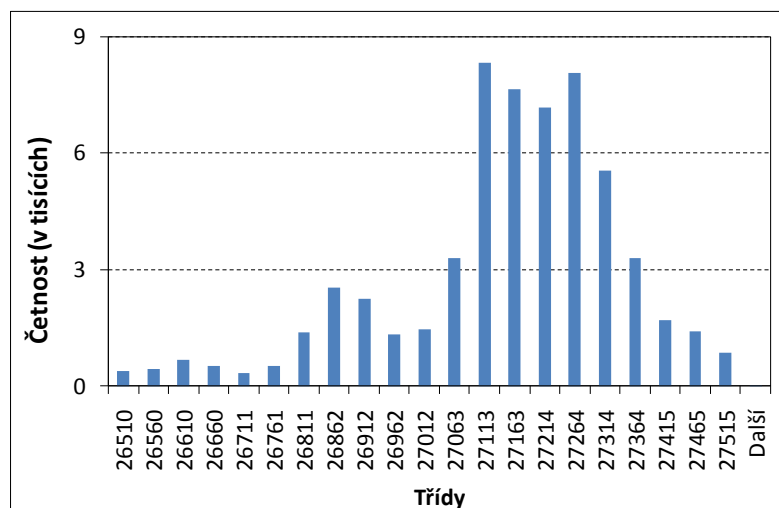
Obr. 6.3 Histogram hodnot koeficientů celkového harmonického zkreslení sdružených napětí primární strany trakčního transformátoru v TT Velešín v roce 2010



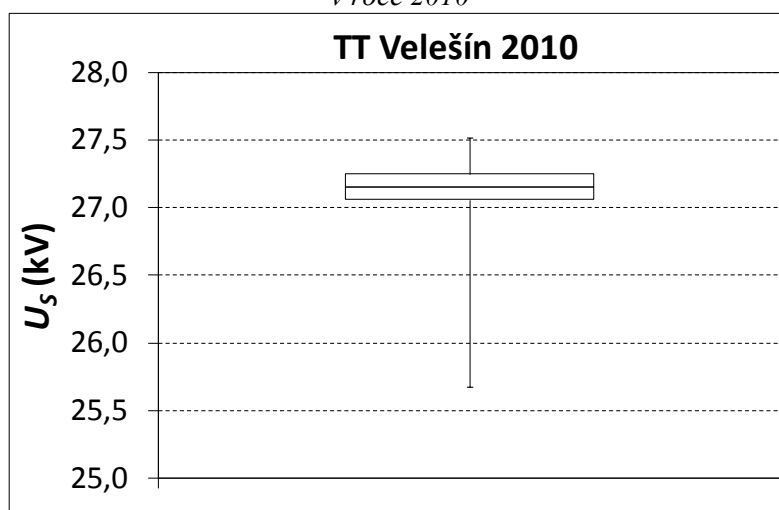
Obr. 6.4 Krabicový graf hodnot koeficientů celkového harmonického zkreslení sdružených napětí primární strany trakčního transformátoru v TT Velešín v roce 2010

Z grafů pro koeficienty harmonického zkreslení  $THD$  je naopak zřejmé, že výběrová šikmost je pro všechna tři napětí  $>0$ , a proto u proměnné převažují hodnoty menší než průměr v době měření v TT Velešín v roce 2010. Medián hodnot koeficientů celkového harmonického zkreslení primárních sdružených napětí trakčního transformátoru se pohyboval okolo hodnoty 0,5 %. (viz. Tab. 6.2).

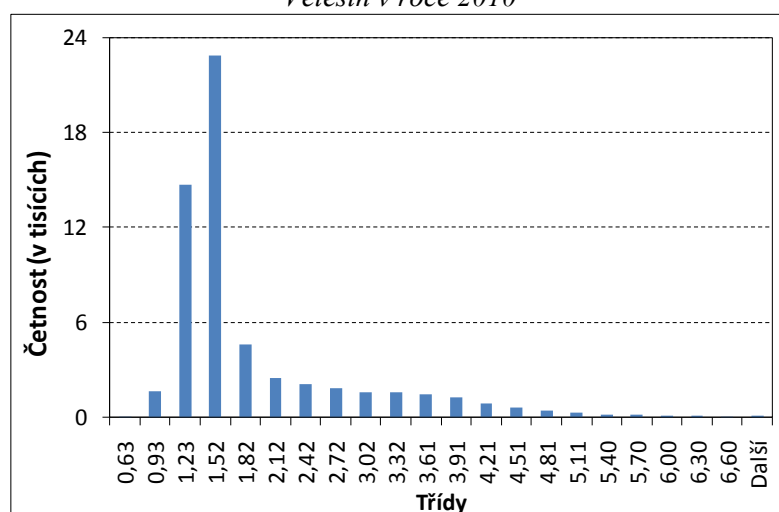




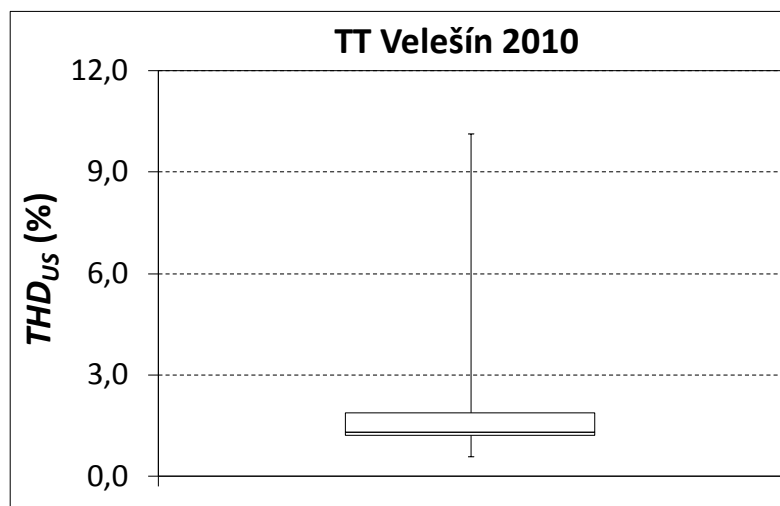
Obr. 6.5 Histogram efektivních hodnot sekundárního napětí trakčního transformátoru v TT Velešín v roce 2010



Obr. 6.6 Krabicový graf efektivních hodnot sekundárního napětí trakčního transformátoru v TT Velešín v roce 2010



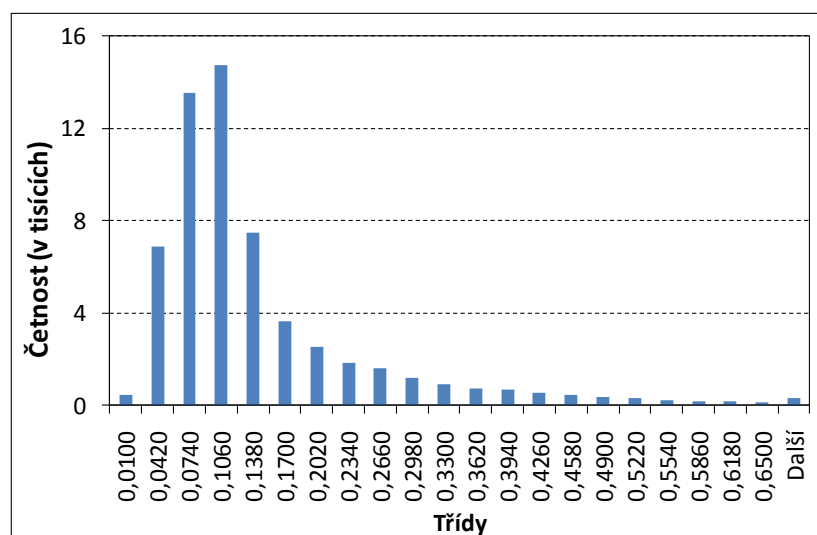
Obr. 6.7 Histogram hodnot koeficientů celkového harmonického zkreslení sekundárního napětí trakčního transformátoru v TT Velešín v roce 2010



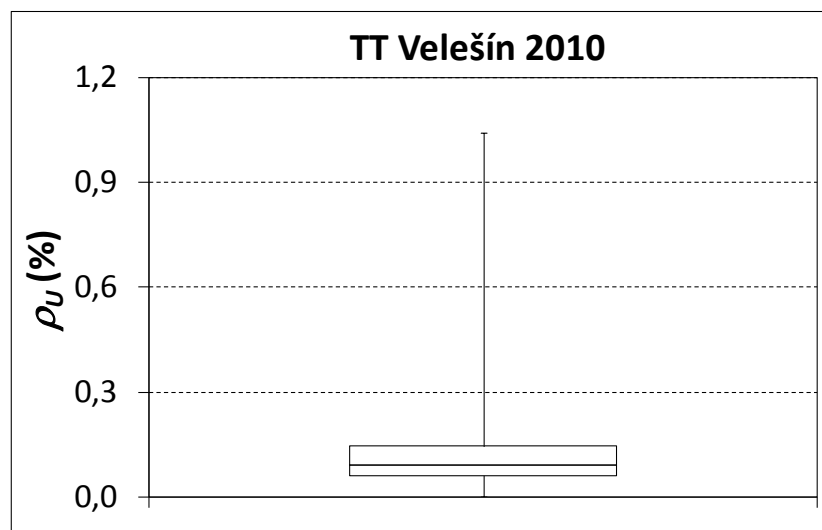
Obr. 6.8 Krabicový graf hodnot koeficientů celkového harmonického zkreslení sekundárního napětí trakčního transformátoru v TT Velešín v roce 2010

Srovnáme-li grafy sekundárních veličin s grafy primárních veličin, můžeme konstatovat, že statistické rozložení četnosti sekundárních veličin kopíruje dle teoretických předpokladů charakter primárních veličin.

Charakter hodnot koeficientu napěťové nesymetrie  $\rho_U$  primární strany trakčního transformátoru v TT Velešín je obdobný jako v případě koeficientů celkového harmonického zkreslení  $THD_U$ .

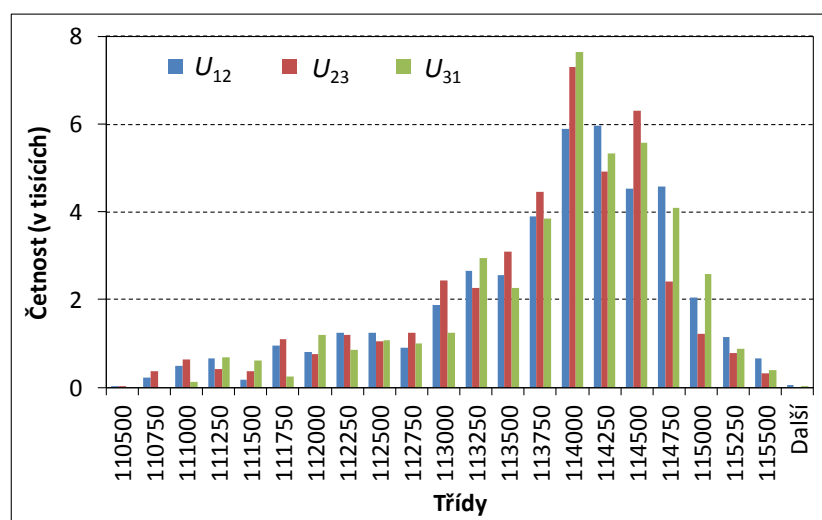


Obr. 6.9 Histogram hodnot koeficientu napěťové nesymetrie  $\rho_U$  primární strany trakčního transformátoru v TT Velešín v roce 2010

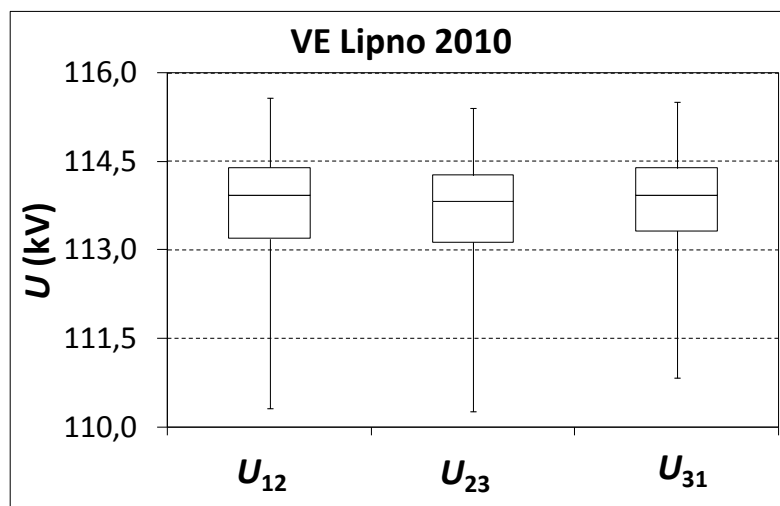


Obr. 6.10 Histogram hodnot koeficientů napětové nesymetrie  $\rho_U$  primární strany trakčního transformátoru v TT Velešín v roce 2010

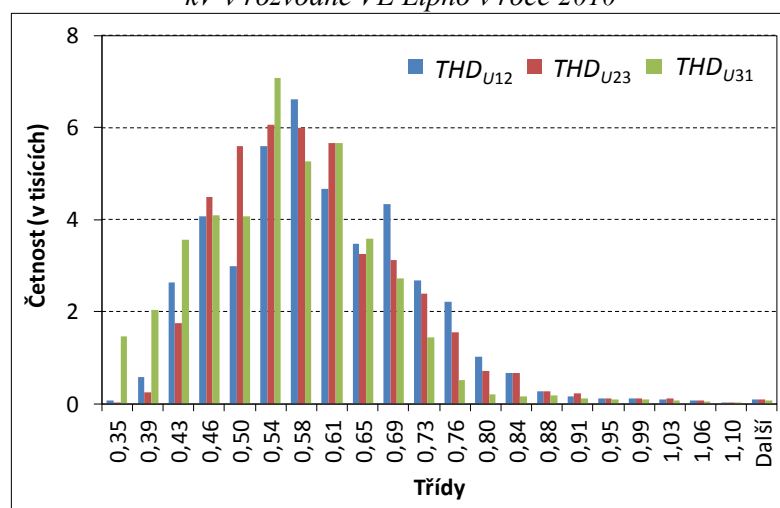
Následující tři grafy zobrazují histogramy výše zmíněných veličin měřených v roce 2010 v rozvodně 110 kV vodní elektrárny Lipno:



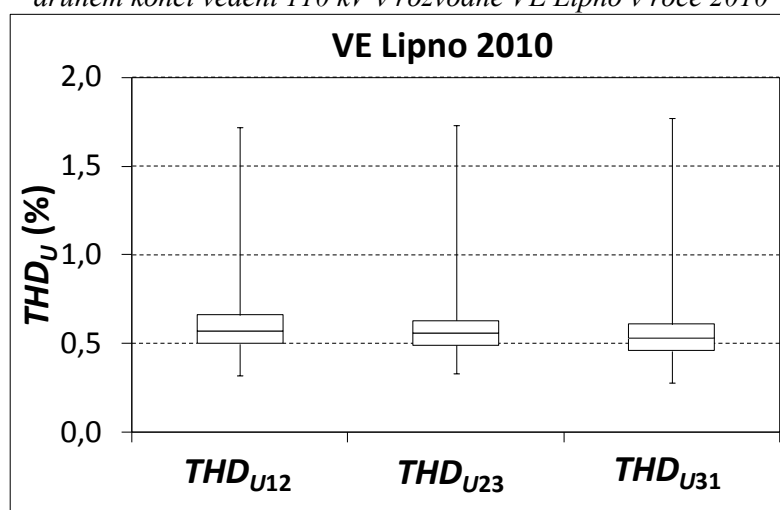
Obr. 6.11 Histogram efektivních hodnot sdružených napětí měřených na druhém konci vedení 110 kV v rozvodně VE Lipno v roce 2010



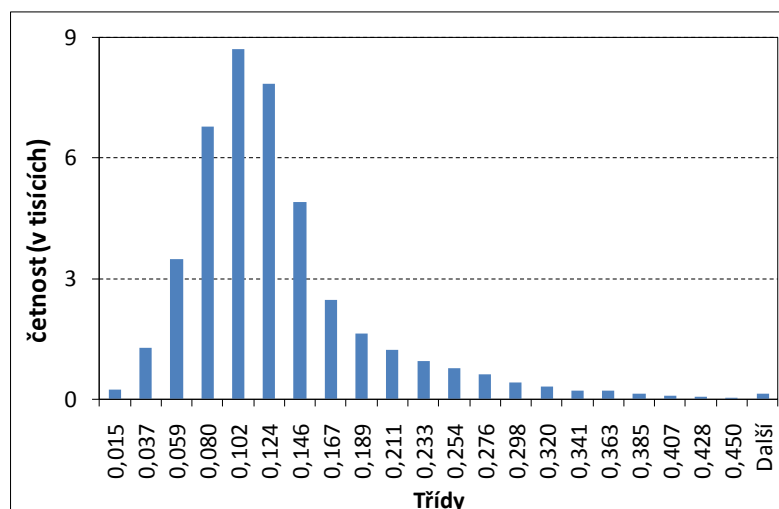
Obr. 6.12 Krabicový graf efektivních hodnot sdružených napětí měřených na druhém konci vedení 110 kV v rozvodně VE Lipno v roce 2010



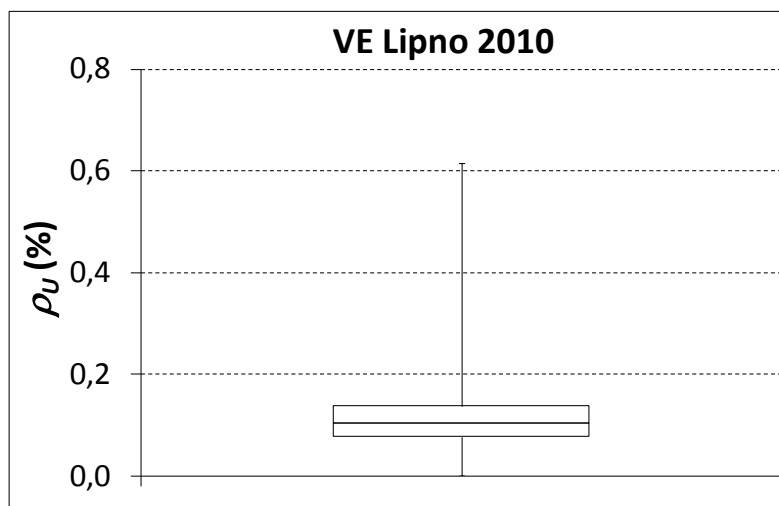
Obr. 6.13 Histogram koeficientů celkového harmonického zkreslení sdružených napětí měřených na druhém konci vedení 110 kV v rozvodně VE Lipno v roce 2010



Obr. 6.14 Krabicový graf koeficientů celkového harmonického zkreslení sdružených napětí měřených na druhém konci vedení 110 kV v rozvodně VE Lipno v roce 2010



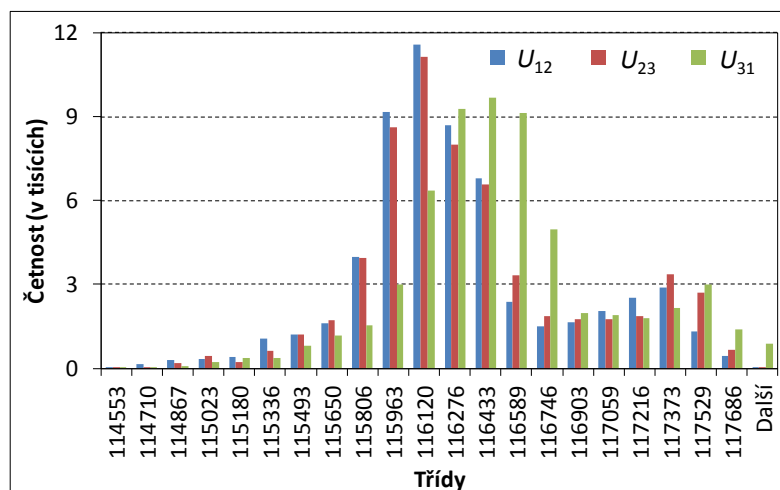
Obr. 6.15 Histogram hodnot koeficientů napěťové nesymetrie  $\rho_U$  sdružených napětí měřených na druhém konci vedení 110 kV v rozvodně VE Lipno v roce 2010



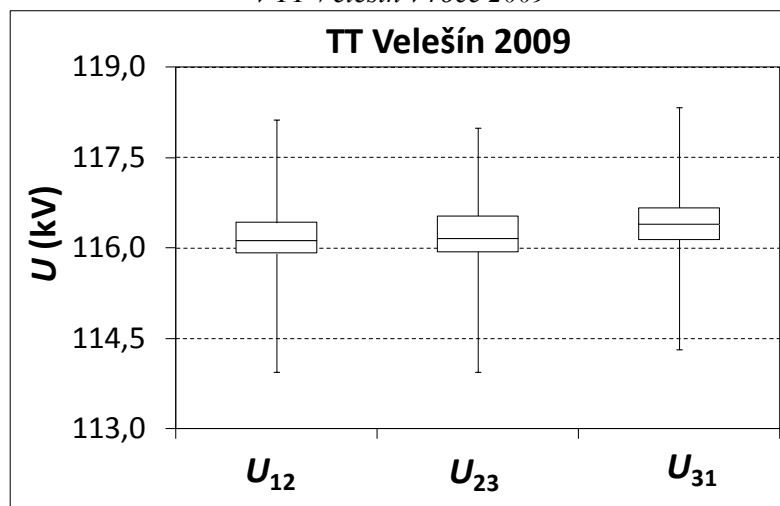
Obr. 6.16 Krabicový graf koeficientů napěťové nesymetrie  $\rho_U$  sdružených napětí měřených na druhém konci vedení 110 kV v rozvodně VE Lipno v roce 2010

Charakter statistických ukazatelů veličin měřených v rozvodně vodní elektrárny Lipno kopíruje charakter hodnot měřených v trakční transformovně Velešín. Za zmínku stojí histogramy a krabicové grafy sdružených napětí. Srovnáme-li mediány jednotlivých fází z obou měřicích stanovišť, vidíme, že v trakční transformovně Velešín jsou hodnoty oproti předpokladu v průměru o 2 kV vyšší než v rozvodně vodní elektrárny Lipno. Toto zjištění může vysvětlovat ta skutečnost, že na trati napájené z trakční transformovny TT Velešín byla v roce 2008 odpojena zpětná relé a na této trati byl zahájen zkušební provoz rekuperačního brzdění na lokomotivách ÖBB řady 1116 a 1216, což také s největší pravděpodobností vedlo ke zvýšeným hodnotám globálních statistických ukazatelů.

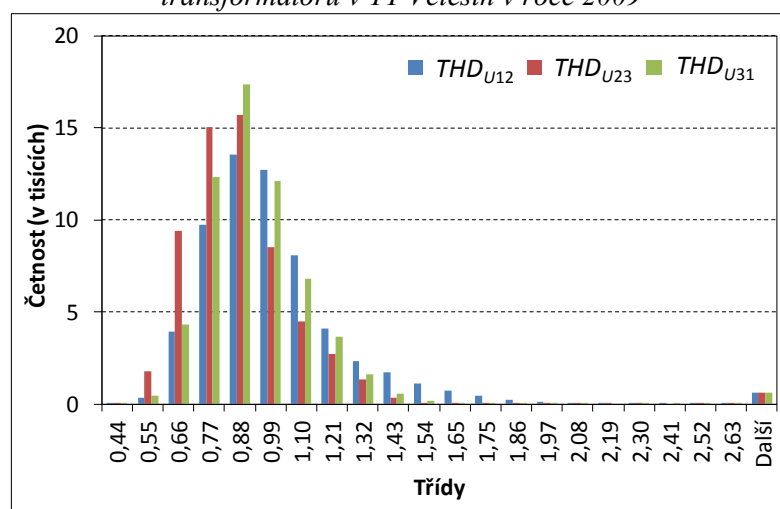
Na následujících pěti grafech jsou zobrazeny histogramy sledovaných veličin měřených v trakční transformovně Velešín v roce 2009:



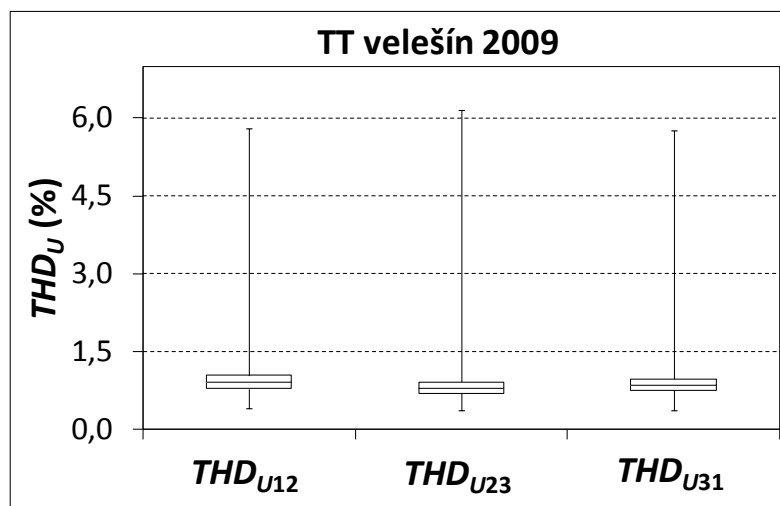
Obr. 6.17 Histogram efektivních hodnot sdružených napětí primární strany trakčního transformátoru v TT Velešín v roce 2009



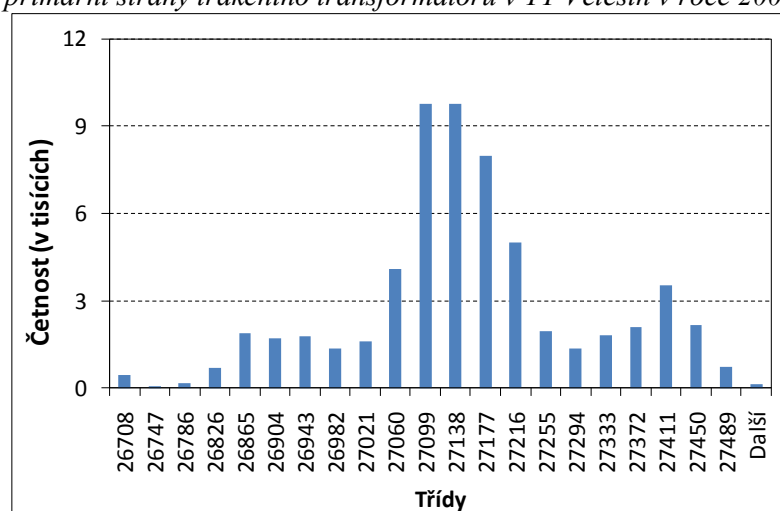
Obr. 6.18 Krabicové grafy efektivních hodnot sdružených napětí primární strany trakčního transformátoru v TT Velešín v roce 2009



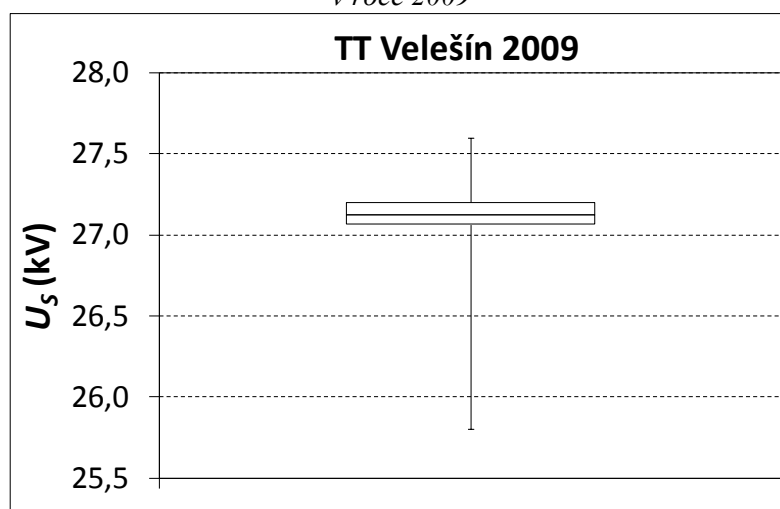
Obr. 6.19 Histogram hodnot koeficientů celkového harmonického zkreslení sdružených napětí primární strany trakčního transformátoru v TT Velešín v roce 2009



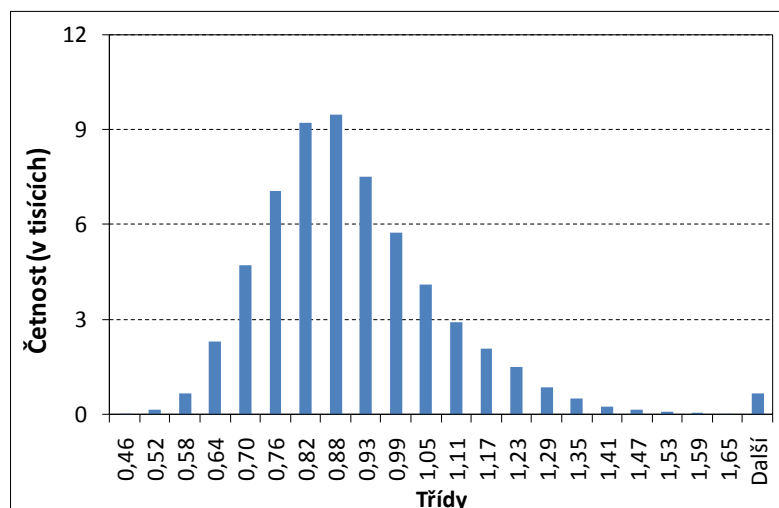
Obr. 6.20 Krabicové grafy hodnot koeficientů celkového harmonického zkreslení sdružených napětí primární strany trakčního transformátoru v TT Velešín v roce 2009



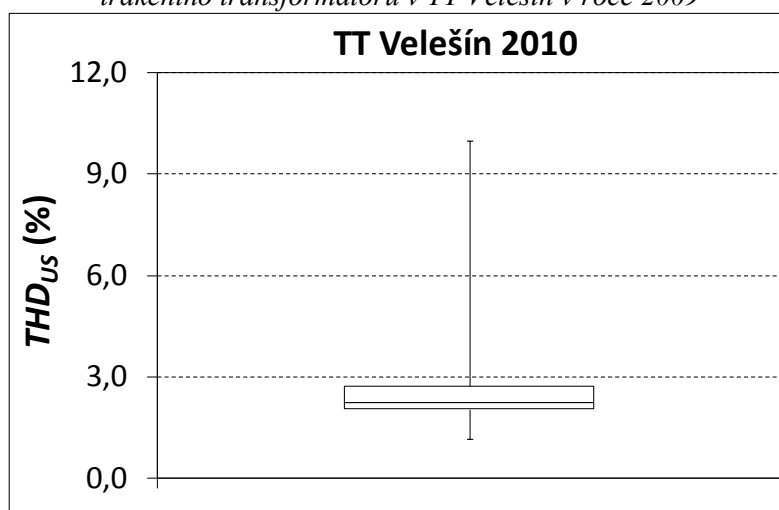
Obr. 6.21 Histogram efektivních hodnot sekundárního napětí trakčního transformátoru v TT Velešín v roce 2009



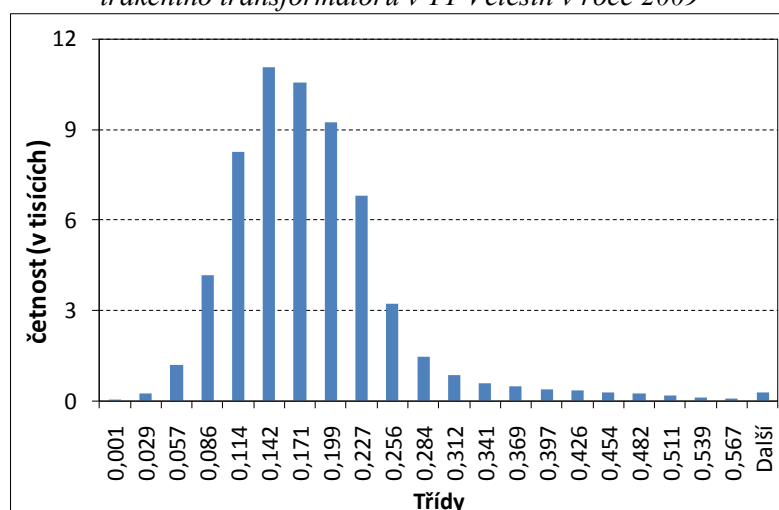
Obr. 6.22 Krabicový graf efektivních hodnot sekundárního napětí trakčního transformátoru v TT Velešín v roce 2009



Obr. 6.23 Histogram hodnot koeficientů celkového harmonického zkreslení sekundárního napětí trakčního transformátoru v TT Velešín v roce 2009

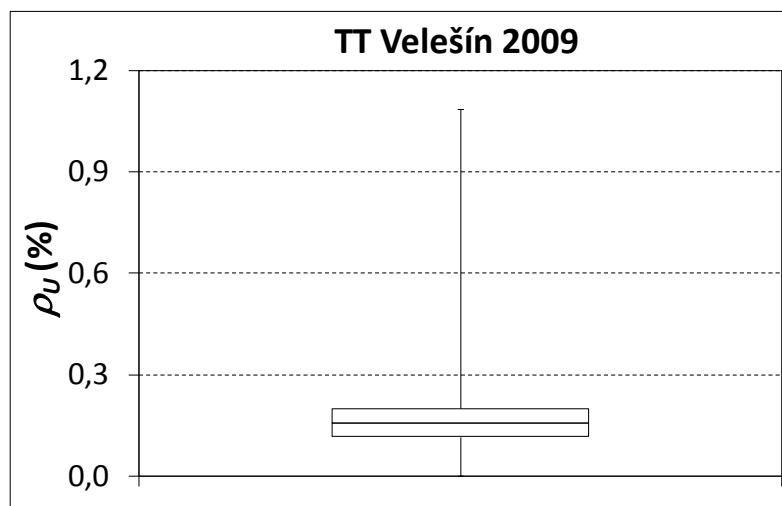


Obr. 6.24 Krabicový graf hodnot koeficientů celkového harmonického zkreslení sekundárního napětí trakčního transformátoru v TT Velešín v roce 2009



Obr. 6.25 Histogram hodnot koeficientů napěťové nesymetrie  $p_U$  primární strany trakčního transformátoru v TT Velešín v roce 2009





*Obr. 6.26 Krabicový graf hodnot koeficientů napěťové nesymetrie  $\rho_U$  primární strany trakčního transformátoru v TT Velešín v roce 2009*

Ze srovnání hodnot měřených s časovým odstupem jednoho roku můžeme usoudit, že hodnoty z roku 2010 svým charakterem kopírují hodnoty z roku předešlého. V roce 2010 došlo z pohledu statistických ukazatelů oproti roku předcházejícímu k mírnému zlepšení parametrů kvality elektrické energie.

## 7 Modelování rušivých vlivů vyvolaných střídavou elektrickou trakcí

Součástí praktické části mé práce bylo vedle měření v reálných podmínkách SŽDC s.o. v trakční transformovně Velešín také vytvoření modelu přenosové cesty „*VE Lipno - vedení 110kV - trakční odběr*“. Data naměřená jak v trakční transformovně Velešín, tak v rozvodně 110 kV vodní elektrárny Lipno byla následně srovnána s daty, která byla výsledkem vytvořeného modelu.

Vlastní model byl vytvořen v simulačním programu *Micro-Cap 9* ve verzi *Evaluation/Student*. Tato verze je plně funkční a od plné verze se liší pouze dvěma omezeními. První omezení spočívá v použití maximálně padesáti prvků, kterými jsou tvořeny modelované obvody. Druhé omezení je pak dané limitovaným množstvím konkrétních typů prvků zmíněných výše. Tato omezená studentská verze je distribuována pro studijní účely zdarma. Pro potřeby mé práce studentská verze plně postačuje a je tak vhodným nástrojem pro modelování napěťové nesymetrie a harmonického zkreslení. Modelování bylo provedeno pro tři stavy odebíraného výkonu - pro maximální špičkový odběr (7,5MVA), pro střední zatížení (3MVA) a pro menší zatížení (1MVA).

V případě malého zatížení však srovnání výsledků modelu a měřených hodnot není stoprocentně vypovídající. Do rozvodny 110 kV vodní elektrárny Lipno byl totiž v době měření současně připojen i jiný odběr, který při malém odebíraném výkonu z trakční transformovny Velešín negativně ovlivňoval výsledky srovnání simulovaných a měřených hodnot. Tomuto ovlivňování nicméně nebylo možné předejít, neboť konkrétní konfigurace dané sítě nebyla předem známa a nebylo ani v mých možnostech požadovat změnu konfigurace sítě. Srovnání pro malý odebíraný trakční výkon je tedy spíše ilustrativního charakteru.

### 7.1 Modelování napěťové nesymetrie - parametry modelu

Obvod modelu pro zjištění přenosu koeficientu napěťové nesymetrie z trakční transformovny směrem k nadřazené rozvodně je složen z náhradního odvodu trakčního odběru, náhradního obvodu trakčního vedení, náhradního obvodu trakčního transformátoru, náhradního obvodu přenosového vedení 110 kV, náhradního obvodu zvyšovacího transformátoru 15/121 kV a náhradního obvodu vodní elektrárny Lipno. Každá z těchto částí obvodu představuje dvojbran a výsledný obvod modelu je dán kaskádním zapojením těchto elementárních dvojbranů. Parametry jednotlivých částí obvodu byly na základě dostupných informací zjištěny následovně:

- Zvyšovací transformátor pro připojení generátoru VE Lipno do elektrizační soustavy

Tab. 7.1: Parametry transformátoru pro připojení generátoru VE Lipno

ímenovitý zdánlivý výkon	75 MVA
ímenovité napětí primární strany	15 kV
ímenovité napětí sekundární strany	121 kV ± 5%
proudový převod	$p_i = 2887/358$ (A)
procentní napětí nakrátko	$u_k = 12,6$ %
ztráty nakrátko	$\Delta P_K = 235$ kW
ztráty naprázdno	$\Delta P_0 = 35$ kW
proud naprázdno	$I_0 = 0,5$ %

U náhradního obvodu transformátoru byla uvažována pouze podélná větev (příčná větev je v modelu zanedbána). Parametry transformátoru 15/121 kV uvedené níže jsou počítány pro vztažnou napěťovou hladinu 110 kV.

(29)

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_V^2}{S_{TN}} = 20,3 \Omega$$

$$R_T = \Delta P_k \cdot \frac{U_V^2}{S_{TN}^2} = 0,5 \Omega \quad (30)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = 20,3 \Omega \quad (31)$$

$$L_T = \frac{X_T}{2 \cdot \pi \cdot f} = 64,6 \text{ mH} \quad (32)$$

- Vedení 110 kV spojující TT Velešín a VE Lipno  
 $R_K = 0,156 \Omega/\text{km}$ ,  $L_K = 1,25 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_K = 9,92 \mu\text{F}/\text{km}$ ,  $l = 35 \text{ km}$   
(svod  $G_K \rightarrow 0$ )
- Trakční transformátor (parametry transformátoru viz. kapitola 5.1) - v náhradním obvodu trakčního transformátoru byl uvažován pouze podélný odpor a podélná reaktance (příčná větev je v modelu zanedbána). Parametry počítány pro vztažnou napěťovou hladinu 27 kV.

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_V^2}{S_{TN}} = 6,94 \Omega \quad (33)$$

$$R_T = \Delta P_k \cdot \frac{U_V^2}{S_{TN}^2} = 0,373 \Omega \quad (34)$$

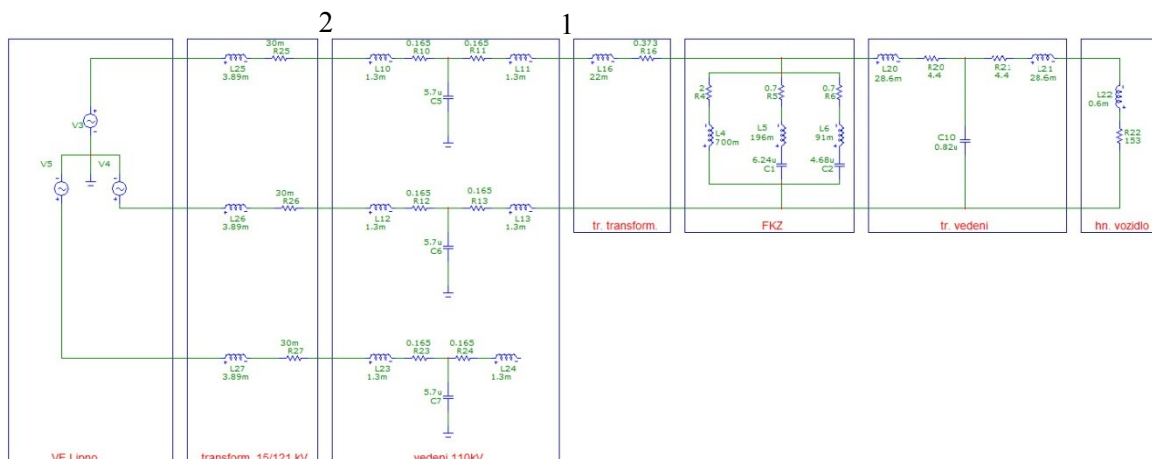
$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = 6,93 \Omega \quad (35)$$

$$L_T = \frac{X_T}{2 \cdot \pi \cdot f} = 22 \text{ mH} \quad (36)$$

- Parametry filtračně-kompenzačního zařízení v TT Velešín:  
dekompensační větev  $L_{1D} = 21,6 \text{ mH}$   
filtr 3. harmonické  $R_{3F} = 0,7 \Omega$ ,  $L_{3F} = 196 \text{ mH}$ ,  $C_{3F} = 6,24 \mu\text{F}$   
filtr 5. harmonické  $R_{5F} = 0,7 \Omega$ ,  $L_{5F} = 91 \text{ mH}$ ,  $C_{5F} = 4,68 \mu\text{F}$
- Trakční vedení  
 $R_K = 0,22 \Omega/\text{km}$ ,  $L_K = 1,43 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_K = 20,5 \text{ nF}/\text{km}$ ,  $l = 40 \text{ km}$

Přesné parametry hnacích vozidel provozovaných na sledované trati nebyly známy. Jejich velikost byla proto odhadnuta s ohledem na velikost proudu a výkonu změřeného v trakční transformovně.

Hodnoty všech parametrů modelu byly přepočítány na vztažnou napětíovou hladinu 27 kV. Schéma modelu vytvořeného v programu Micro-Cap na základě výše zmíněných parametrů je na Obr. 7.1.



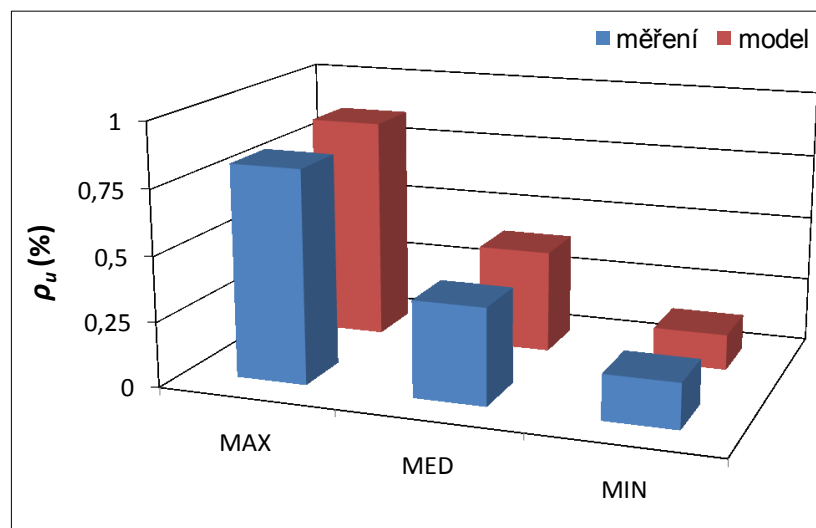
Obr. 7.1 Náhradní schéma modelu pro simulaci přenosu napětíové nesymetrie

Třífázový souměrný zdroj na straně VE Lipno generuje symetrické třífázové napětí. Trakční odběr simulují připojením dvoufázové zátěže k výše zmíněnému třífázovému zdroji. Změnou parametrů hnacího vozidla dochází ke změně odebíraného proudu ze zdrojů  $V3$  a  $V4$ . Tím dochází ke změně úbytků napětí na prvcích přenosové cesty.

### 7.1.1 Výsledky modelování přenosu napětíové nesymetrie po vedení 110 kV

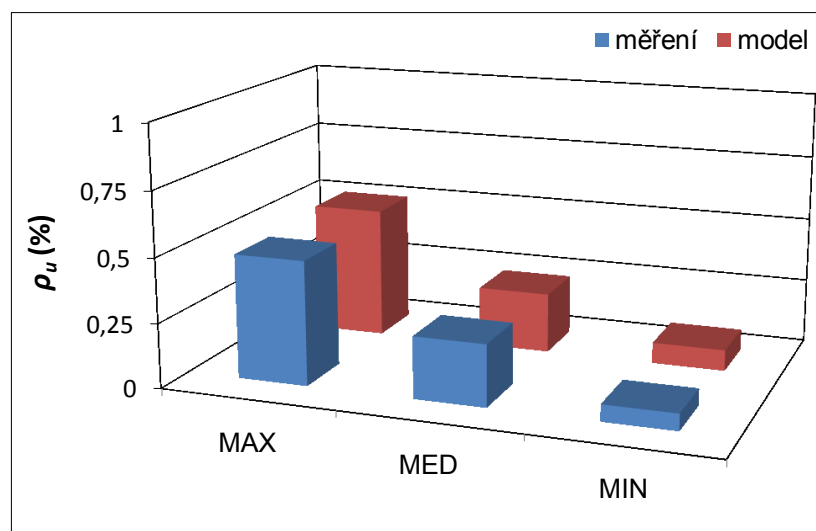
Mým cílem bylo modelovat přenos napětíové nesymetrie od trakční transformovny směrem k nadřazené rozvodně. Velikost koeficientu napětíové nesymetrie jsem tedy zjišťoval ve dvou bodech. Prvním bodem je přívodní rozvodna trakční transformovny Velešín - místo připojení k distribuční síti. V modelu na Obr. 7.1 jde o bod mezi trakčním transformátorem a vedením 110 kV - bod 1. Druhým bodem je pak konec přenosového vedení, tj. bod mezi vedením 110 kV a transformátorem 15/121 kV. V modelu na Obr. 7.1 jde o bod 2. Výsledky modelování přenosu koeficientu napětíové nesymetrie po vedení 110 kV jsou na Obr. 7.2 a Obr. 7.3.

Graf na Obr. 7.2 zobrazuje modelované hodnoty koeficientu napětíové nesymetrie v měřicím bodě na primární straně trakčního transformátoru a jejich srovnání s hodnotami změřenými v trakční transformovně Velešín. Jak již bylo psáno v kapitole 7, modelovány byly tři stavy: při maximálním špičkovém odběru (7,5MVA), při středním zatížení (3MVA) a při menším zatížení (1MVA). Výsledky simulace a měření se v zásadě shodují, kromě již výše zmíněného malého odebíraného trakčního výkonu.



Obr. 7.2 Srovnání výsledků modelu a měření koeficientu nap. nesymetrie na prim. straně trakč. transf. pro maximální (MAX), střední (MED) a minimální (MIN) odběr

Obdobně jako v případě měřicího bodu na primární straně trakčního transformátoru jsem srovnával výsledky modelování a měření koeficientu napětové nesymetrie pro měřicí bod na druhém konci vedení 110kV - v rozvodně VE Lipno. Srovnání je na Obr. 7.3. Stejně jako v předchozím případě modelování jsem i nyní modeloval tři stavy: maximální špičkový odběr (7,5 MVA), střední zatížení (3 MVA) a nižší zatížení (1 MVA). I v tomto případě se výsledky modelu shodují s naměřenými hodnotami. Menší odchylka opět vznikla pouze v případě malého odběru (MIN).



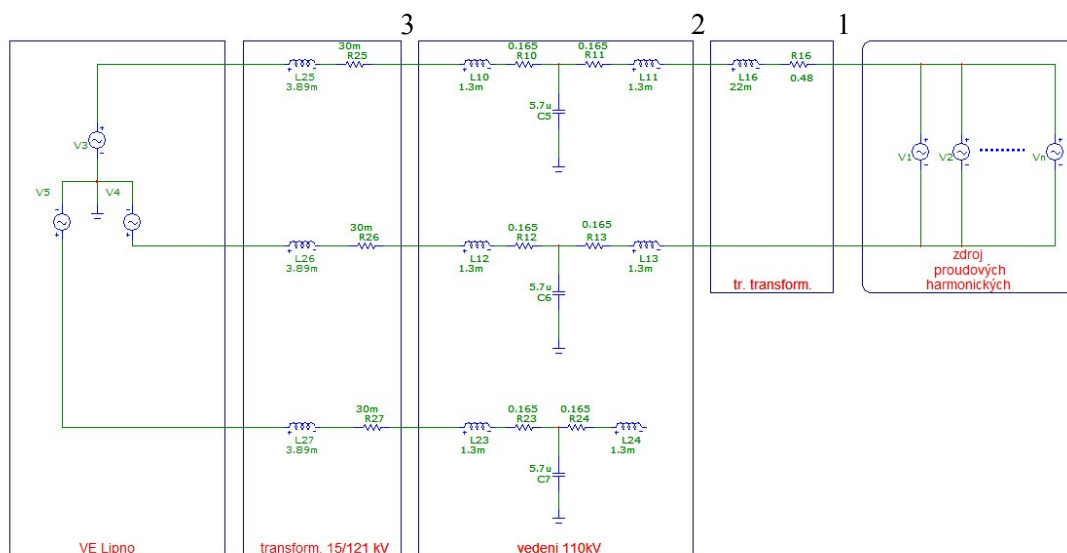
Obr. 7.3 Srovnání výsledků modelu a měření koeficientu nap. nesymetrie na konci vedení 110 kV pro maximální (MAX), střední (MED) a minimální (MIN) odběr

## 7.2 Modelování proudových harmonických - parametry modelu

Stejně jako při modelování přenosu koeficientu napět'ové nesymetrie je i v případě modelování přenosu proudových harmonických obvod modelu složen z kaskádního spojení dvojbranů představujících jednotlivé části obvodu. Těmito částmi jsou zdroj proudových harmonických, trakční transformátor, přenosové vedení 110 kV spojující TT Velešín a VE Lipno, zvyšovací transformátor 15/121 kV a souměrný třífázový zdroj, který představuje VE Lipno. Zdroj harmonických je tvořen paralelním spojením elementárních zdrojů proudu jednotlivých harmonických do řádu 40.

V případě modelování přenosu harmonických jsem postupoval mírně odlišně, než tomu bylo při modelování napět'ové nesymetrie. Do paralelně spojených zdrojů, představujících zdroj harmonického rušení, jsem zadával amplitudy proudů jednotlivých harmonických změřených na sekundární straně trakčního transformátoru. Následně jsem sledoval, jak se projeví jejich přenos přes trakční transformátor a vedení 110 kV. Výsledky jsem dal do srovnání s reálnými hodnotami změřenými na primární straně trakčního transformátoru a v rozvodně 110 kV vodní elektrárny Lipno. Pro účel simulace byly brány v úvahu liché harmonické, případně některé významné sudé (pokud se tyto v měřených hodnotách vyskytovaly).

Hodnoty všech parametrů modelu jsou uvedeny v kapitole 7.1 a v modelu jsou přepočítány na vztažnou napět'ovou hladinu 27 kV. Schéma modelu pro modelování přenosu proudových harmonických vytvořeného v programu Micro-Cap na základě výše zmíněných parametrů se nachází na Obr. 7.4.



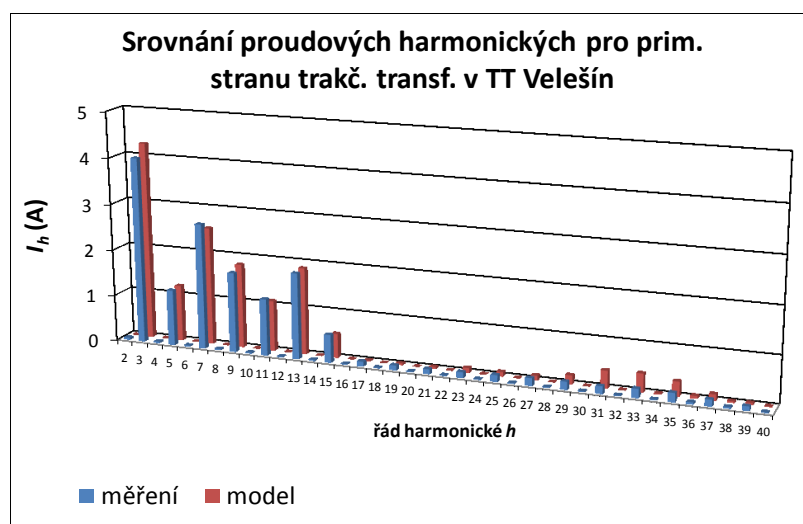
Obr. 7.4 Schéma modelu pro simulaci přenosu proudových harmonických

Stejně jako v případě modelování přenosu koeficientu napět'ové nesymetrie, i v případě modelování přenosu proudových harmonických bylo modelování provedeno pro tři stavy odebraného výkonu: stav při maximálním špičkovém odběru (7,5 MVA), při středním zatížení (3 MVA) a při menším zatížení (1 MVA).

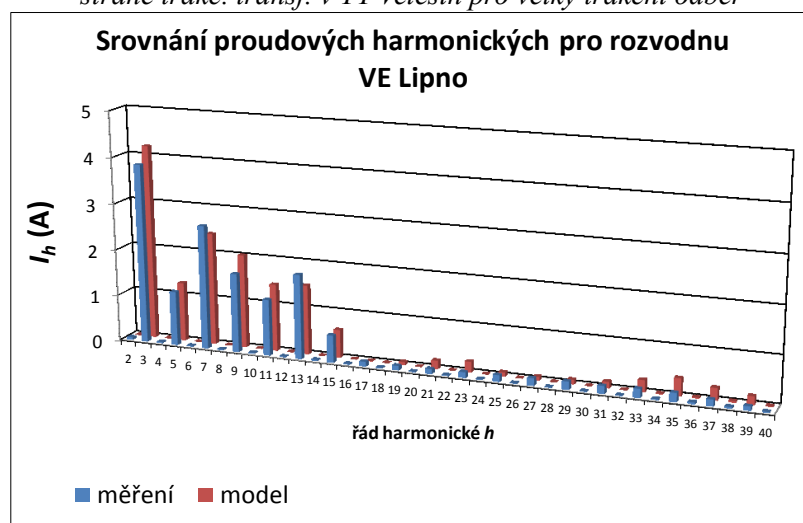
Do modelu jsem zadával hodnoty proudových harmonických změřených na sekundární straně trakčního transformátoru – bod 1 na Obr. 7.4. Přenos proudových harmonických jsem zjišťoval ve dvou bodech. Prvním bodem je primární strana trakčního transformátoru v trakční transformovně Velešín. Jde o místo styku trakční napájecí soustavy a veřejné distribuční sítě. Na Obr. 7.4 označeno jako bod 2. Druhým místem je pak konec přenosového vedení 110 kV. Jde o uzel mezi vedením 110 kV a zvyšovacím transformátorem 15/121 kV vodní elektrárny Lipno - bod 3 na Obr. 7.4.

### 7.2.1 Výsledky modelování přenosu proudových harmonických po vedení 110 kV

Výsledky modelování přenosu proudových harmonických přes trakční transformátor a po vedení 110 kV pro velké zatížení jsou na Obr. 7.6 a Obr. 7.5. Jak je z grafů patrné, model s určitou přesností v zásadě odpovídá změřeným hodnotám. Pro lepší přehlednost grafů byla potlačena základní harmonická.

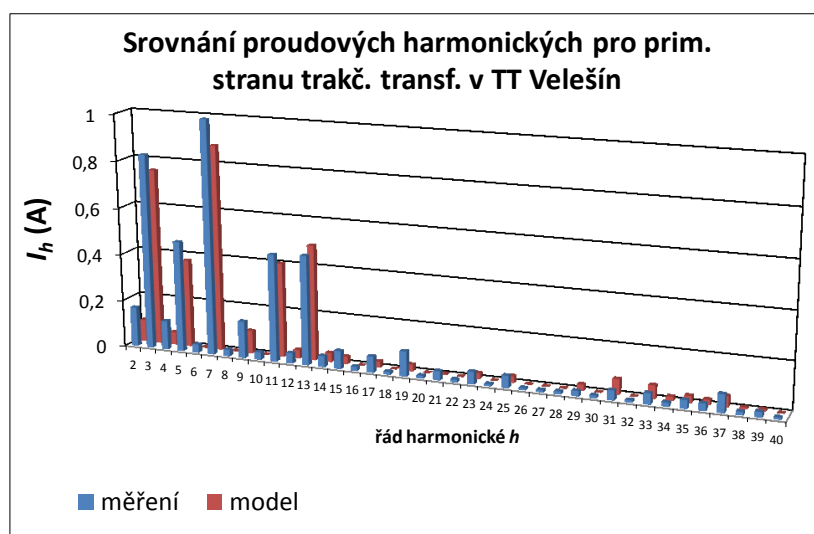


Obr. 7.5 Srovnání simulace přenosu harmonických a měřených hodnot pro měřicí místo na primární straně trakč. transf. v TT Velešín pro velký trakční odběr

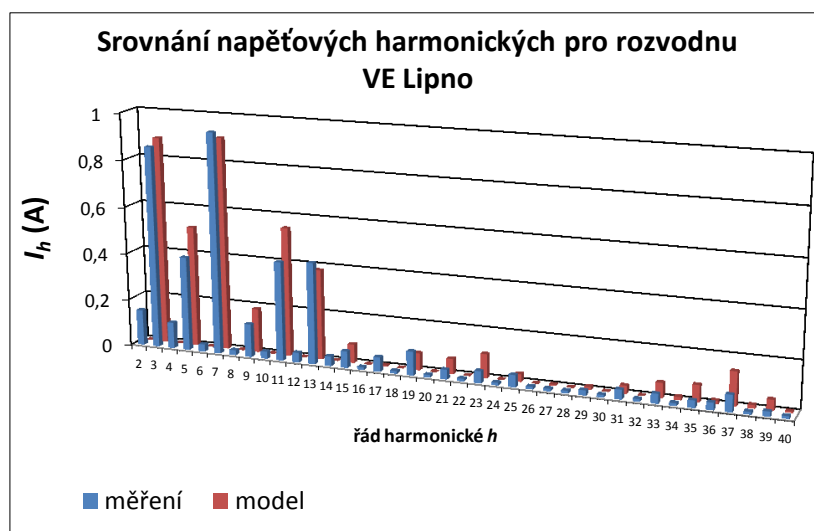


Obr. 7.6 Srovnání simulace přenosu harmonických a měřených hodnot pro měřicí místo ve VE Lipno pro velký trakční odběr

Výsledky modelování přenosu proudových harmonických přes trakční transformátor a po vedení 110 kV pro středně velké zatížení jsou na Obr. 7.8 a Obr. 7.7. Pro lepší přehlednost byla opět potlačena první harmonická. Jak je z těchto dvou grafů patrné, model pro středně velký trakční odběr opět odpovídá s určitou přesností změřeným hodnotám. V případě středně velkého odběru se již mírně začíná projevovat určitý rozdíl mezi hodnotami modelu a změřenými hodnotami. Tyto rozdíly jsou, jak již bylo zmíněno dříve, patrně způsobovány dalším odběrem zapojeným do rozvodny VE Lipno, který tak nepříznivě ovlivňoval měření. Rozdíly hodnot je však možné vzhledem k velikosti základní harmonické považovat za zanedbatelné. Tento jev je pak ještě o něco více patrný v případě malého odběru (MIN).



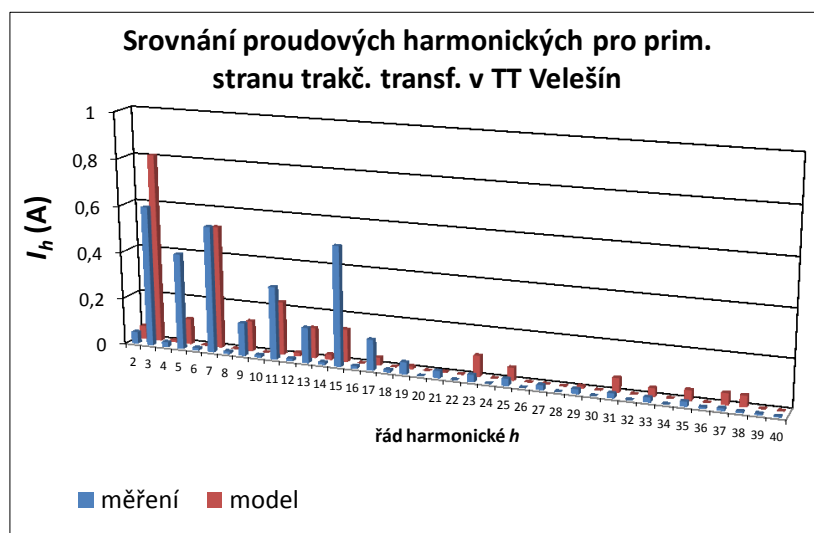
Obr. 7.7 Srovnání simulace přenosu harmonických a měřených hodnot pro měřicí místo na primární straně trakč. transf. v TT Velešín pro středně velký trakční odběr



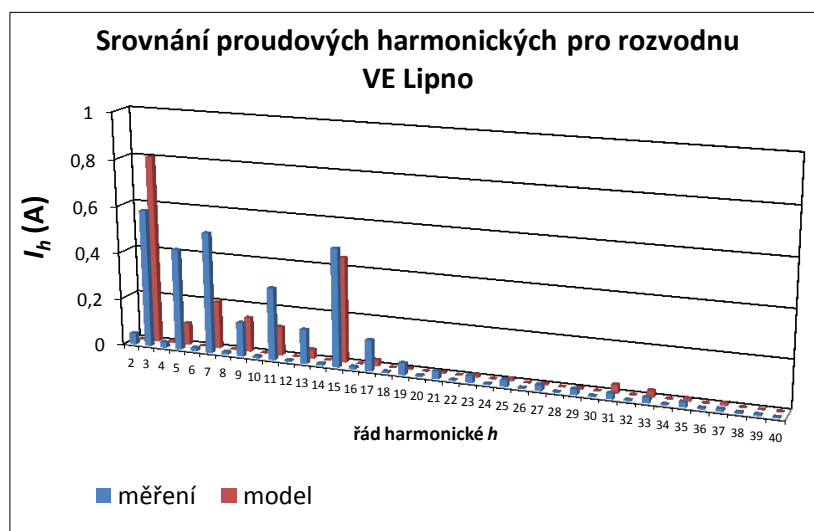
Obr. 7.8 Srovnání simulace přenosu harmonických a měřených hodnot pro měřicí místo ve VE Lipno pro středně velký trakční odběr



V případě malého trakčního odběru již bohužel převažuje vliv jiného odběru z rozvodny VE Lipno více než v předchozích případech. Z tohoto důvodu tedy, jak již bylo řečeno v kapitole 7, nemá toto srovnání takovou vypovídající hodnotu jako v předešlých dvou případech a je tedy spíše ilustrativního charakteru. První harmonická byla opět pro zlepšení přehlednosti grafu potlačena.



Obr. 7.9 Srovnání simulace přenosu harmonických a měřených hodnot pro měřicí místo na primární straně trakč. transf. v TT Velešín pro malý trakční odběr



Obr. 7.10 Srovnání simulace přenosu harmonických a měřených hodnot pro měřicí místo ve VE Lipno pro malý trakční odběr

## 8 Závěr

Se zvyšujícím se počtem a výkonem zdrojů elektromagnetického rušení nabývá v poslední době problematika elektromagnetické kompatibility a elektromagnetického rušení stále více na významu. Elektroenergetické soustavy přitom patří mezi nejvíce elektromagneticky znečištěná prostředí. Potřebě měření a vyhodnocování kvality elektrické energie je proto věnována stále větší pozornost.

Kvalitu elektrické energie můžeme popsat mnoha ukazateli (např. norma ČSN EN 50160 jich uvádí třináct). Má disertační práce se ovšem omezuje jen na dva ukazatele, které jsou pro zpětné působení elektrické trakce na napájecí soustavu 110 kV charakteristické. Sledovanými zpětnými vlivy jsou koeficient napěťové nesymetrie  $\rho_U$  a míra harmonického zkreslení vyjádřená koeficientem celkového harmonického zkreslení  $THD_U$ . Jako prostředek pro měření okamžitých hodnot elektrických veličin ve stanovených měřicích stanovištích jsem zvolil metodu virtuální instrumentace. Pro grafickou prezentaci výsledků měření jsem využil tabulkového procesoru MS Excel.

Cílem předkládané disertační práce tedy bylo zjistit zvolenými postupy míru zpětných vlivů, kterými působí trakční napájecí soustava na nadřazenou distribuční síť. Pro tento účel byla zvolena metodika jak pro měření, tak i pro následné vyhodnocení naměřených dat. Byly vytvořeny měřicí aparatury na bázi virtuální instrumentace a tyto následně kalibrovány a odzkoušeny v laboratorních podmínkách. Po dokončení technických příprav a po dohodě s pracovníky SŽDC, s.o, E.ON Distribuce, a.s, a ČEZ, a.s. následovalo vlastní měření v trakční transformovně Velešín a v nadřazené rozvodně vodní elektrárny Lipno. Měření probíhalo ve dvou po sobě následujících letech. V roce 2009 jsem prováděl měření pouze v trakční transformovně Velešín, v roce následujícím navíc i rozvodně 110 kV vodní elektrárny Lipno. V TT Velešín v roce 2009 byly zjištěny následující hodnoty 95-ti procentních percentilů koeficientu napěťové nesymetrie a koeficientů celkového harmonického zkreslení:  $\rho_U = 0,2470$ ,  $THD_{U12} = 1,4009$ ,  $THD_{U23} = 1,1748$ ,  $THD_{U31} = 1,1993$ . V TT Velešín v roce následujícím byly hodnoty 95-ti procentních percentilů koeficientu napěťové nesymetrie a koeficientů celkového harmonického zkreslení následující:  $\rho_U = 0,3437$ ,  $THD_{U12} = 0,8672$ ,  $THD_{U23} = 0,7427$ ,  $THD_{U31} = 0,6617$ . Pro VE Lipno v roce 2010 byly zjištěny následující hodnoty 95ti procentních percentilů koeficientu napěťové nesymetrie a koeficientů celkového harmonického zkreslení:  $\rho_U = 0,2256$ ,  $THD_{U12} = 0,7590$ ,  $THD_{U23} = 0,7508$ ,  $THD_{U31} = 0,6866$ . Vyhodnocení naměřených dat tedy přineslo informaci o tom, že ač jsou v poslední době nasazována do provozu hnací vozidla stále větších výkonů a se stále složitějším způsobem regulace výkonu, případně jsou používána některá netradiční řešení (například napájení netrakovních odběrů z trakčního vedení), nachází se hodnoty sledovaných zpětných vlivů v rámci povolených mezí, což ostatně dokazují i výše zmíněné hodnoty devadesátipěti procentních percentilů. Z meziročního srovnání je patrné, že zatímco míra koeficientu celkového harmonického zkreslení poklesla, míra napěťové nesymetrie vzrostla. Toto může být dáno právě nasazováním nových typů hnacích vozidel, u kterých dochází k nárůstu výkonu, ovšem za současného sofistikovanějšího filtrování generovaných harmonických. Výsledky vyhodnocení naměřených dat jsem následně využil pro verifikaci výsledků modelování.

Dalším cílem mé práce bylo osvojení si softwaru pro simulaci zkoumaných zpětných vlivů trakčního napájecího systému a vytvořit tak model, který bude možno použít pro simulaci požadovaných stavů trakčního napájecího systému. Pro účely mé práce jsem si zvolil simulační program Micro-Cap 9 ve verzi Evaluation/Student, která přestože má oproti plné verzi jistá omezení, pro mé potřeby plně postačovala. Z výsledků simulování všech konfigurací, které jsem si na začátku této části své práce stanovil, vyplynul závěr, že výsledky získané měřením jsou téměř shodné s výsledky modelování. Určitá míra neshody nastala v případě malého trakčního odběru, kdy se začal projevovat vliv jiného odběru připojeného do rozvodny vodní elektrárny Lipno. Srovnání dat této varianty simulace tak nelze považovat za zcela vypovídající a je třeba jeho charakter chápat spíše jako ilustrativní. Celkové výsledky simulace společně se srovnáním s výsledky měření jsou uvedeny v kapitole 7.1.1 a 7.2.1.

Přínos této práce vnímám jako zdroj cenných informací pro oblast elektromagnetické kompatibility. Vytvořená měřicí aplikace může být nadále využívána jak pro další monitorování zpětných vlivů trakční soustavy na napájecí síť, tak např. pro potřeby výuky. Model, navržený v simulačním programu Micro-Cap 9, umožní predikovat vliv připojené jednofázové zátěže na rozvodny, ze kterých vychází napájecí vedení, v době před jejich instalací. Praktická ověření míry sledovaných zpětných vlivů pak mohou být velmi užitečná jak pro pracovníky Správy železniční dopravní cesty, s.o., tak pro rozvodnou společnost E.ON Distribuce, a.s. zajišťující dodávku elektrické energie pro napájení elektrické trakce, případně pro pracovníky společnosti ČEZ a.s., která vlastní vodní elektrárnu Lipno. I přes skutečnost, že sledované zpětné vlivy trakční napájecí soustavy se nacházely v tolerančních mezích, doporučuji se problematice monitorování vlivů elektrické vozby na napájecí soustavu i nadále věnovat, neboť progres v oblasti elektrické trakce je nemalý a do budoucna se jeho útlum nepředpokládá.

## Seznam použité literatury

- [1] Lanáková, G.; Oslovič, V.: *Pevné elektrické trakčné zariadenia*, Žilinská univerzita v Žilíně, 2006, ISBN 80-8070-507-0
- [2] Paleček, J.: *Napájení jednofázové vozby ČD z hlediska elektromagnetické kompatibility*, VŠB-TU Ostrava, 2000, ISBN 80-78-791-0
- [3] Drábek, J.: *Dynamika a energetika elektrické trakce*, Alfa, 1981, 1. vydání, 181 s.
- [4] Danzer, J.: *Elektrická trakce II*, Západočeská univerzita, Plzeň, 2001, 1. vydání, ISBN 80-7082-814-5
- [5] Židek, J.: *Softwarové systémy automatizace měření I*, VŠB – TU Ostrava, výuková skripta, 1996
- [6] Židek, J.: *Grafické programování ve vývojovém prostředí LabVIEW*, VŠB – TU Ostrava, Výuková skripta, 2002
- [7] Mičulka, P.: *Měření parametrů distribučních a průmyslových sítí*, VŠB – TU Ostrava, Diplomová práce, 2007
- [8] Kijonka, J.: *Diagnostika elektrických veličin*, VŠB-TU Ostrava, výuková skripta, 2004
- [9] Haasz, V.; Sedláček, M.: *Elektrická měření – přístroje a metody*, vydavatelství ČVUT, Praha, 1998, ISBN 80-01-01717-6
- [10] Paleček, J.; Mičulka, P.; Kolář, V.: *Vliv jednofázové vozby na energetickou soustavu - šíření napěťové nesymetrie ve vedení 110 kV*, In Sborník mezinárodní vědecké konference EPE 2011 - Kouty nad Desnou 17-19.5.2011, Ostrava:VŠB-TU Ostrava, 2011, ISBN 978-80-248-2393-5
- [11] Dennis, J. C.; Saha, T. K.: *Investigation of the Propagation of Harmonic Distortion from Traction Converters into Traction and Transmission Systems*, In Proceedings of the Power Engineering Society General Meeting, 2006, MontrealQuebec, June 2006, ISBN 1-4244-0493-2
- [12] Xie, S; Gao, S.; Li, Q.: *Study on Measurement Methods of Harmonic of Traction Load*, In Proceedings of the 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON'04, Tokyo Denki University, 2004, ISBN 0-7803-8730-9
- [13] Chudáček, V.; Konečný, I.; Stoll, K.: *Problémy elektrické kompatibility kolejových obvodů*, Vědeckotechnický sborník 16/2002, [www.cdmail.cz/VTS](http://www.cdmail.cz/VTS)
- [14] Rajský, F.: *Porovnání výsledků simulace a experimentálního měření harmonických frekvencí*, Vědeckotechnický sborník 29/2010, [www.cdmail.cz/VTS](http://www.cdmail.cz/VTS)
- [15] Hlava, K; Hrubý, J.: *Elektrická trakční energie*, Vědeckotechnický sborník 31/2011, [www.cdmail.cz/VTS](http://www.cdmail.cz/VTS)
- [16] Crappe, M.: *Electric Power Systems*, ISTE Ltd, 2008, London, 392 s., ISBN 978-1-84821-008-0
- [17] Satori, M.: *Frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojových transformátorů s izolačním napětím 123 kV v rozvodně 110 kV, trakční napájecí stanice 25 kV, 50 Hz*, Vědeckotechnický sborník 29/2010, [www.cdmail.cz/VTS](http://www.cdmail.cz/VTS)
- [18] Howroyd, D. C.: *Public supply disturbance from AC traction*, In Proceedings of the International Conference on Main Line Railway Electrification, York, UK, 1989, s. 260-264
- [19] Hill, R. J.: *Electric Railway Traction, Part 3, Traction Power Supplies*, Power Engineering Journal, 1994, s. 275-286, ISSN 0950-3366

- [20] Jansa, F.: *Elektrická trakcia I*, Alfa, 1975, 1. vydání, 446 s.
- [21] Hradílek, Z.: *Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení*, Montanex, Ostrava, 2008, ISBN 978-80-7225-291-6
- [22] Morrison, R. E.: *Power Quality Issues on AC Traction Systems*, In Proceedings of the Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, Orlando: University of Florida, 2000, ISBN 0-7803-6499-6
- [23] Vokáč, P.: *Vyšší harmonické na tratích elektrizovaných střídavou napájecí soustavou*, Sborník prací VUŽ, č.1, 1974
- [24] Morrison, R. E.: *Parameters that influence Power Quality on Industrial Frequency AC Traction Systems*, In Proceedings of the Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, 2001, s. 204-209, ISBN 0-7803-7173-9
- [25] Bičovská, B.: *Elektrická měření*, VŠB-TU Ostrava, výuková skripta, 2003
- [26] Briš, R.: *Statistické metody v inženýrské praxi*, VŠB-TU Ostrava, výuková skripta, 2008
- [27] <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/lipno.html>
- [28] <http://www.ni.com/support/utilities.htm>
- [29] <http://www.lem.com>

## Použité normy

- [30] ČSN EN 50 160: *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě*. (2000)
- [31] EN 61 800-3 *Mezní hodnoty a zkušební postupy pro vyzařování rušení a odolnost proti rušení pro elektrické pohony s měnitelnými otáčkami*
- [32] *Pravidla provozování distribučních soustav, Příloha 3*, Energetický regulační úřad, 17.3. 2009

## Vlastní publikace

### Web of Science

- [1] Paleček, J.; Kolář, V.; Stýskala, V.; Mičulka, P.; Zaruskaia, T.: *Analysis of the Impact electric chariots on the power system - measurement of asymmetry*, In Elektroenergetika 2009 : proceedings of the fifth international scientific symposium on Electric Power Engineering, Košice:Technická univerzita Košice, 2009, 4, ISBN 978-80-553-0237-9
- [2] Paleček, J.; Stýskala, V.; Kijonka, J.; Mičulka, P.; Zharkov Y.I.: *Analysis of Electric Railways Influence on Electrical Power System - current and voltage harmonics*, In Proceedings of the 10th International Scientific Conference ELECTRIC POWER ENGINEERING 2009, Ostrava:VŠB-TU Ostrava, 2009, 5, ISBN 978-80-248-1947-1
- [3] Mičulka, P.; Paleček, J.; Kolář, V.; et al: *Cooperation of Traction Transformer Substation with Electric Power System in term of EMC*, In Proceedings of the 11th International Scientific Conference ELECTRIC POWER ENGINEERING 2010, Brno:Brno University of Technology, 2010, s. 551-554, ISBN 987-80-214-4094-4
- [4] Kolář, V.; Paleček, J.; Mičulka, P.; et al: *An Analysis of the Influence of Traction Transformer Substation in Velesin on Power Network in Terms of Unbalance*, In Proceedings of the 11th International Scientific Conference ELECTRIC POWER ENGINEERING 2010, Brno:Brno university of Technology, 2010, s. 555-558, ISBN 978-80-214-4094-4

### Ostatní

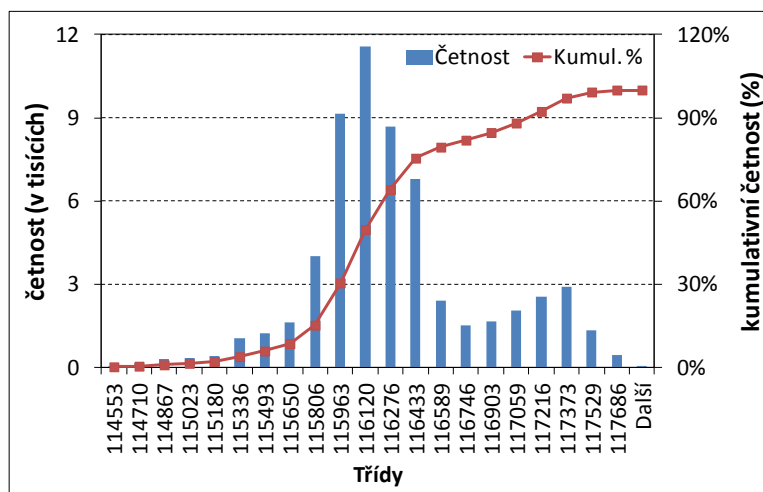
- [5] Paleček, J.; Mičulka, P.; Kolář, V.: *Influence of 1-phase Railway Traction on Power Supply System - Spreading of Voltage Unbalance over 110 kV Utility Network*, In Proceedings of the 12th International Scientific Conference ELECTRIC POWER ENGINEERING 2011, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011, ISBN 978-80-248-2393-5  
*Pozn.: Konference registrovaná na WoS, příspěvky z letošního roku zatím nezaevidovány.*
- [6] Kijonka, J.; Machová, M.; Mičulka, P.: *Virtuální laboratoř tříprvkových obvodových modelů elektromagnetických jevů*, In Sborník 17. semináře "Moderní matematické metody v inženýrství", Ostrava:JČMF pobočka Ostrava, 2008, p. 95-96, ISBN 978-80-248-1871-9
- [7] Kijonka, J.; Machová, M.; Mičulka, P.: *Vyhodnocení vědomostních testů a samostatných prací studentů v předmětu Teorie obvodů I*, In Proceedings of Electronic Version of Reviewed Contribution MSIE 6", 2008, 6 s., 978-80-7231-511-6
- [8] Mičulka, P.: *Evaluating of Influence of Traction Substations on Power Supply System*. In WOFEX 2008 proceedings of the 6th annual workshop, Ostrava:VŠB-TU Ostrava, 2008, 124-129, ISBN 978-80-248-1807-8
- [9] Mičulka, P.: *Měření parametrů průmyslových a distribučních sítí*, In XXXVIII. SEŠIT KATEDRY ELEKTROTECHNIKY, Ostrava:Katedra elektrotechniky, FEI, VŠB-TU Ostrava, 2008, s. 5-10, ISBN 978-80-248-1708-8

- [10] Mičulka, P.; Machová, M.: *Vliv trakčních měření tramvajových drah na napájecí soustavu*, In Medzinárodná konferencia učiteľov elektrotechniky, *SEKEL 2008*, Košice:Technická univerzita (Košice, Slovensko), Katedra elektrotechniky, mechatroniky a priemyselného inžinierstva, 2008, 978-80-553-0065-8
- [11] Mičulka, P.: *Vyhodnocování vlivu trakčních měření tramvajových drah na napájecí soustavu*, In XXXIX. Sešit katedry elektrotechniky, Ostrava:Katedra elektrotechniky, FEI, VŠB-TU Ostrava, 2008, 42-43, ISBN 978-80-248-1786-6
- [12] Orság, P.; Mičulka, P.; Zajaczek, S.: *Modelování magnetizace jádra transformátoru ve virtuální laboratoři*, In Nové směry v zpracování signálů IX, Liptovský Mikuláš:Akademía ozbrojených síl, 2008, 6 stran, ISBN 978-80-8040-345-4
- [13] Kijonka, J.; Mičulka, P.: *O neekvivalenci paralelního a sériového obvodového modelu*, In Sborník z 18. semináře Moderní matematické metody v inženýrství, Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava, 2009, s. 151-155, ISBN 978-80-248-2118-4
- [14] Kijonka, J.; Zajaczek, S.; Mičulka, P.: *Srovnání akademických let 07/08 a 08/09 v předmětu Teorie obvodů I*, In Sborník 27. kolokvia o řízení vzdělávacího procesu, Brno:Univerzita obrany Brno, 2009, 4 s., ISBN 978-80-7231-650-2
- [15] Mičulka, P.: *Vliv elektrické vozby na napájecí soustavu*, In XL. Sešit katedry elektrotechniky, Ostrava:Katedra elektrotechniky, FEI, VŠB-TU Ostrava, 2009, ISBN 978-80-248-1955-6
- [16] Mičulka, P.: *Influence of AC Traction System on Power Supply System*, In WOFEX 2009, Ostrava:Dept. of Computer Science, VŠB - Technical University of Ostrava, 2009, 66-70, ISBN 978-80-248-2028-6
- [17] Mičulka, P.: *Vliv střídavé elektrické vozby na energetickou soustavu*, In XLI. Sešit katedry elektrotechniky, Ostrava:Katedra elektrotechniky, FEI, VŠB-TU Ostrava, 2009, 5 s., ISBN 978-80-248-2020-0
- [18] Paleček, J.; Kijonka, J.; Stýskala, V.; Mičulka, P.; Kocman, S.: *Vliv elektrické vozby na napájecí soustavu z hlediska harmonických*, In Sborník XLI. semináře katedry elektrotechniky, Ostrava:VŠB-TU, Katedra elektrotechniky, 2009, s. 23-27, ISBN 978-80-248-2020-0
- [19] Mičulka, P.: *Vliv střídavé elektrické vozby na napájecí soustavu z hlediska harmonických a napětové nesymetrie*, In XLII. Sešit katedry elektrotechniky, Ostrava:Katedra elektrotechniky, FEI, VŠB-TU Ostrava, 2010, s. 6-11, ISBN 978-80-248-2177-1
- [20] Mičulka, P.: *Analýza spolupráce trakční transformovny a energetické soustavy z hlediska rušivých vlivů*, In XLIII. Sešit katedry elektrotechniky, Ostrava:Katedra elektrotechniky, FEI, VŠB-TU Ostrava, 2010, s. 14-18, ISBN 978-80-248-2240-2
- [21] Paleček, J.; Mičulka, P.; Stýskala, V.; Kolář, V.: *Spolupráce trakční a energetické soustavy - šíření napětové nesymetrie ve vedení 110 kV*, Nová železniční technika 5/2011, str.15-20, ISSN 1210 - 3942

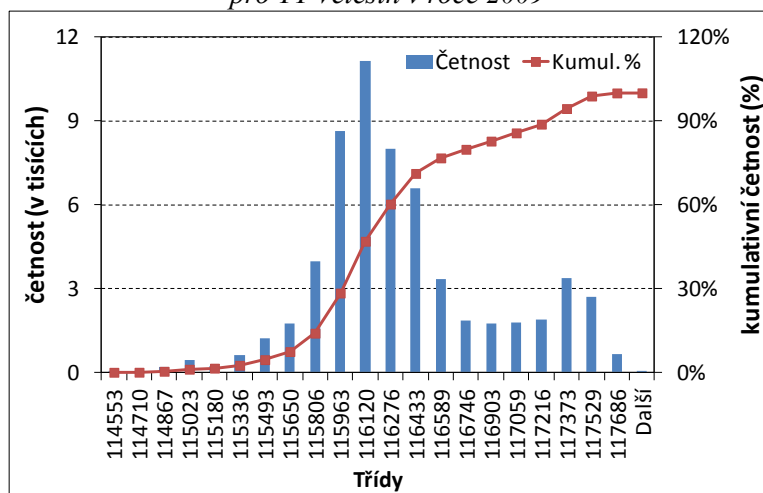
# **Přílohy**

(doplňující informace k výsledkům měření)

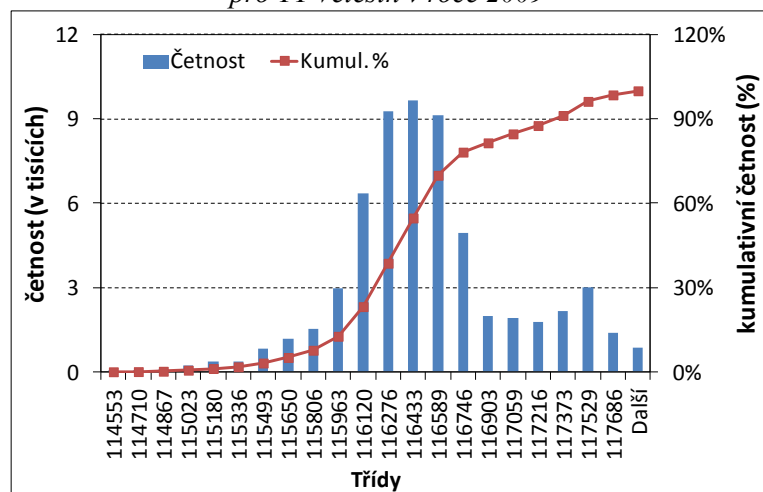




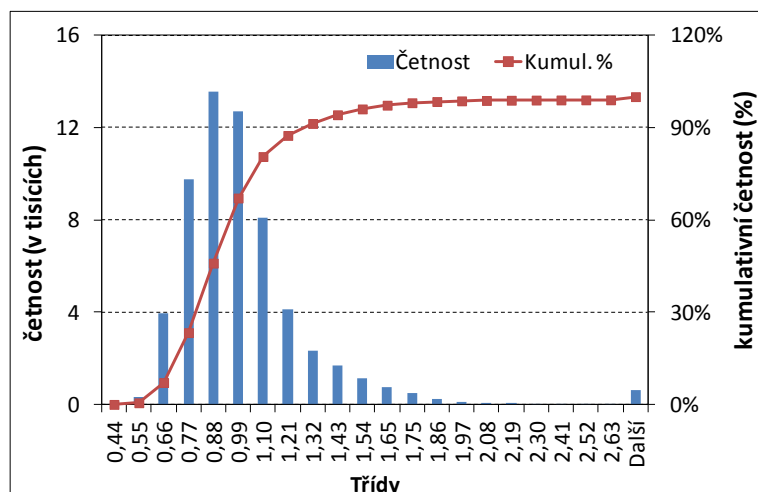
Obr. P 1 Histogram efektivních hodnot primárního napětí  $U_{12}$  včetně kumulativní četnosti pro TT Velešín v roce 2009



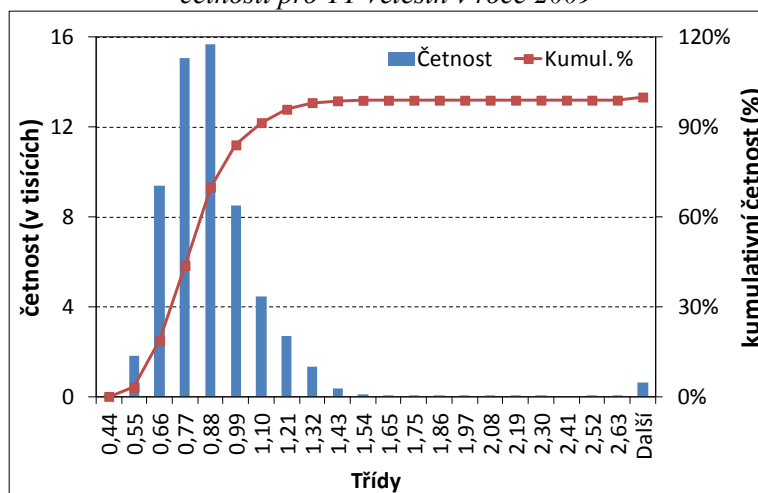
Obr. P 2 Histogram efektivních hodnot primárního napětí  $U_{23}$  včetně kumulativní četnosti pro TT Velešín v roce 2009



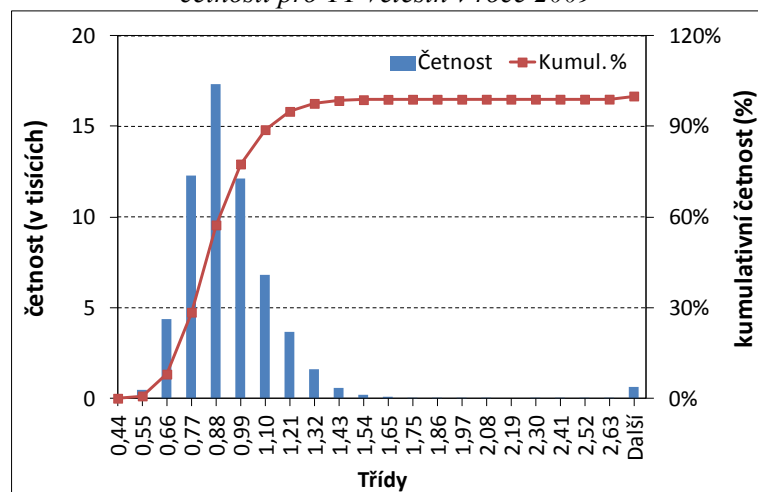
Obr. P 3 Histogram efektivních hodnot primárního napětí  $U_{31}$  včetně kumulativní četnosti pro TT Velešín v roce 2009



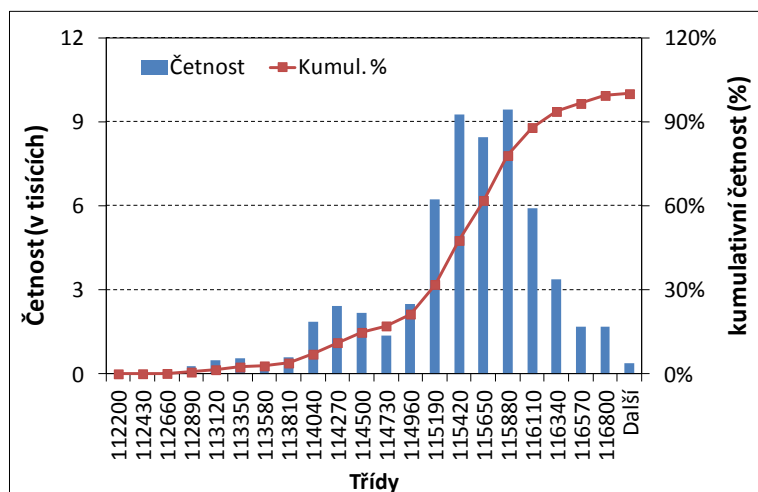
Obr. P 4 Histogram hodnot koeficientu celk. zkreslení  $THD_{U12}$  primárního napětí včetně kumulativní četnosti pro TT Velešín v roce 2009



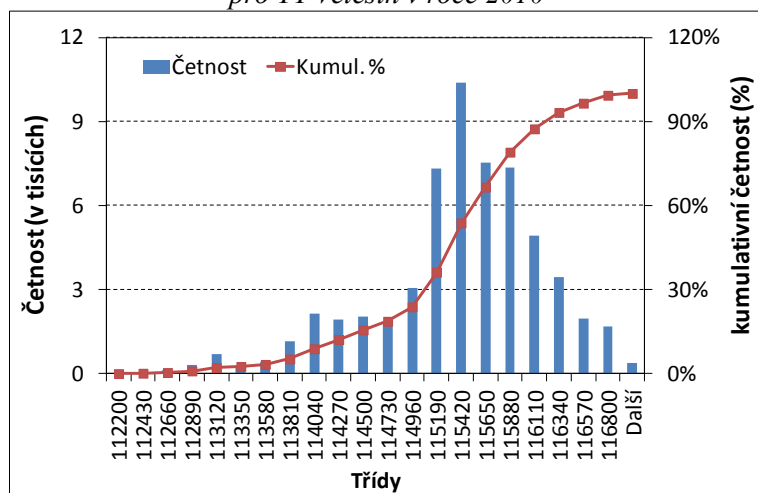
Obr. P 5 Histogram hodnot koeficientu celk. zkreslení  $THD_{U23}$  primárního napětí včetně kumulativní četnosti pro TT Velešín v roce 2009



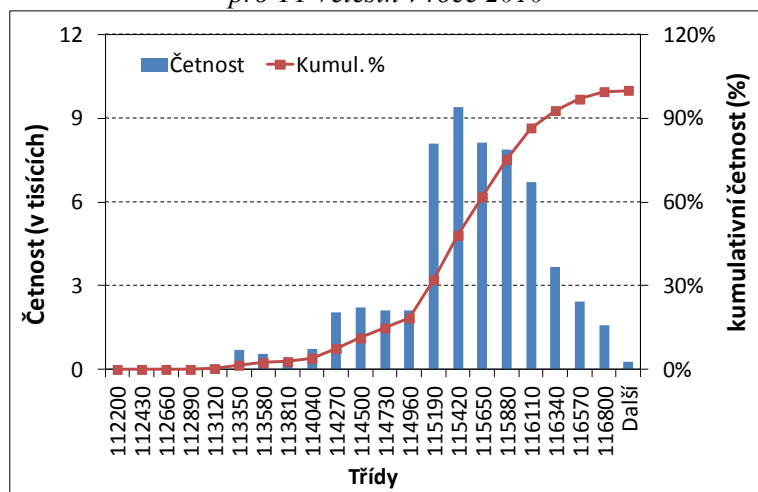
Obr. P 6 Histogram hodnot koeficientu celk. zkreslení  $THD_{U31}$  primárního napětí včetně kumulativní četnosti pro TT Velešín v roce 2009



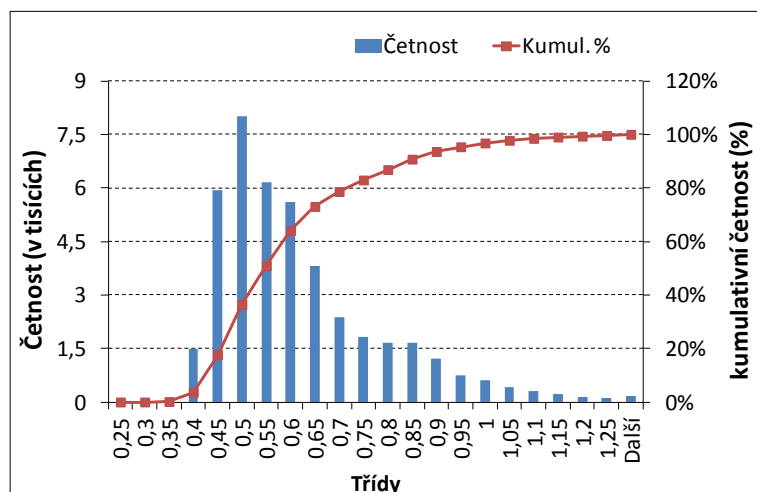
Obr. P 7 Histogram efektivních hodnot primárního napětí  $U_{12}$  včetně kumulativní četnosti pro TT Velešín v roce 2010



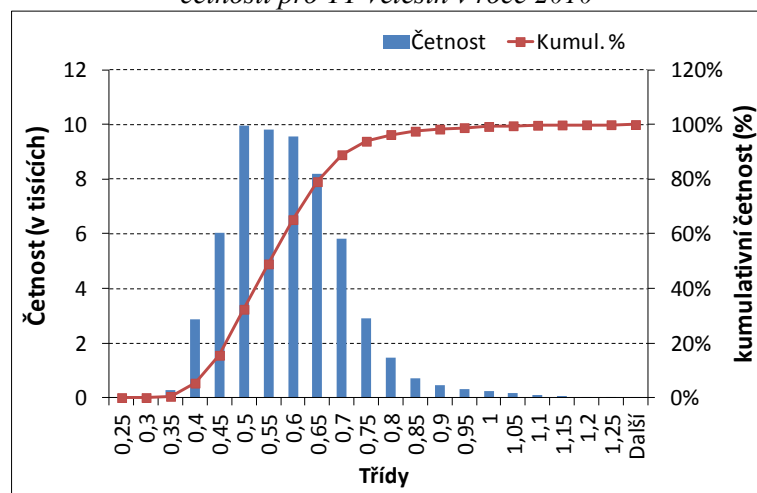
Obr. P 8 Histogram efektivních hodnot primárního napětí  $U_{23}$  včetně kumulativní četnosti pro TT Velešín v roce 2010



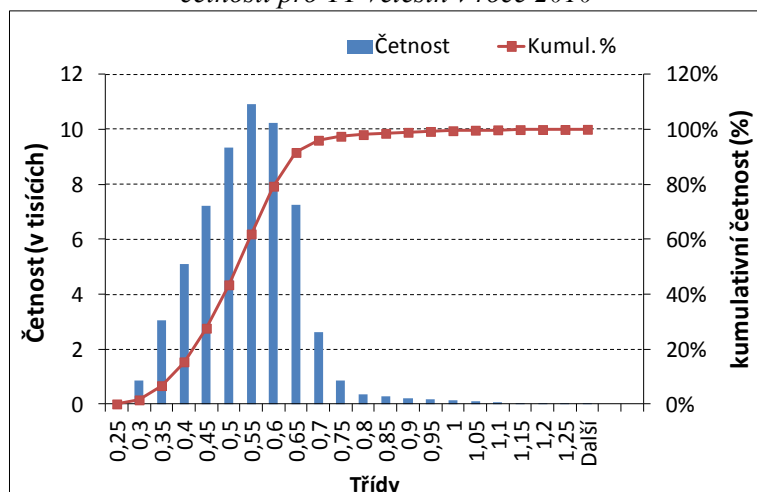
Obr. P 9 Histogram efektivních hodnot primárního napětí  $U_{31}$  včetně kumulativní četnosti pro TT Velešín v roce 2010



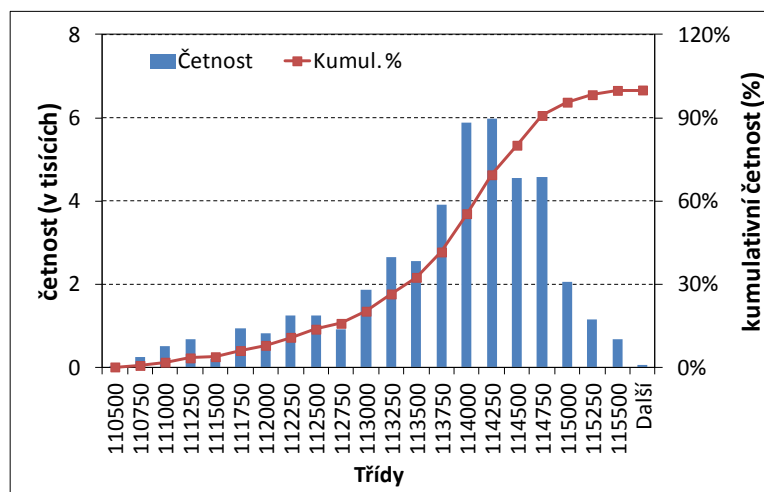
Obr. P 10 Histogram hodnot koeficientu celk. zkreslení  $THD_{U12}$  primárního napětí včetně kumulativní četnosti pro TT Velešín v roce 2010



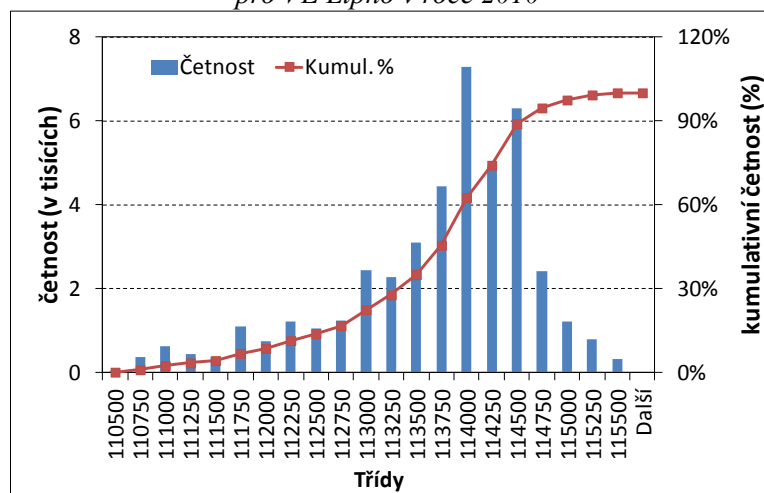
Obr. P 11 Histogram hodnot koeficientu celk. zkreslení  $THD_{U23}$  primárního napětí včetně kumulativní četnosti pro TT Velešín v roce 2010



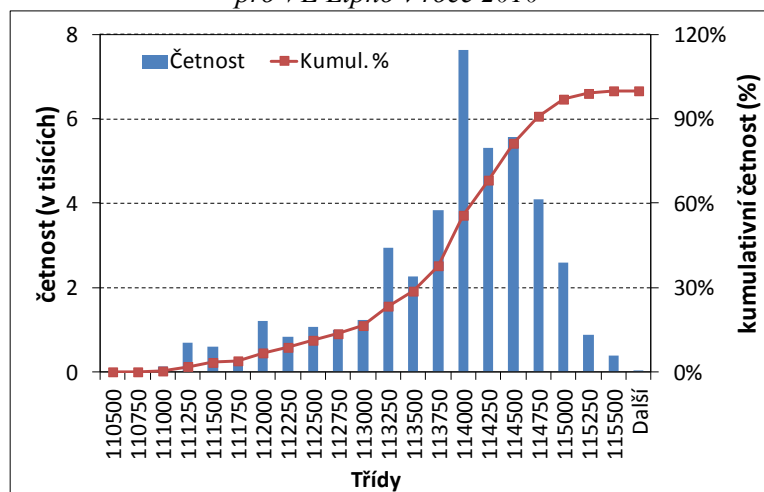
Obr. P 12 Histogram hodnot koeficientu celk. zkreslení  $THD_{U31}$  primárního napětí včetně kumulativní četnosti pro TT Velešín v roce 2010



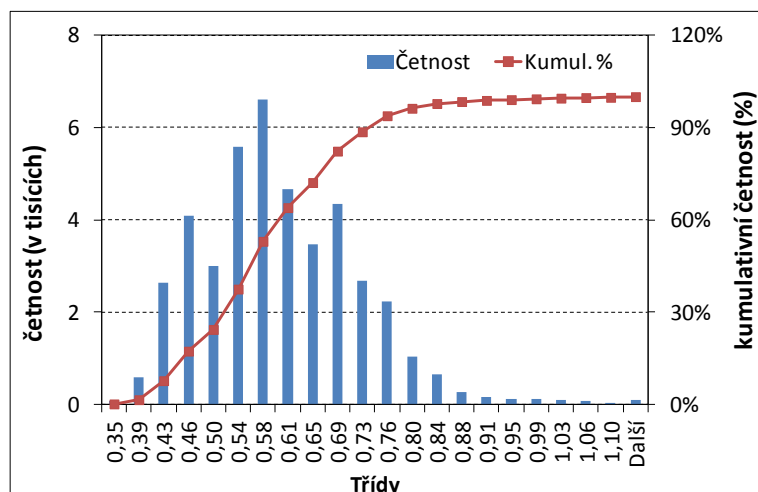
Obr. P 13 Histogram efektivních hodnot primárního napětí  $U_{12}$  včetně kumulativní četnosti pro VE Lipno v roce 2010



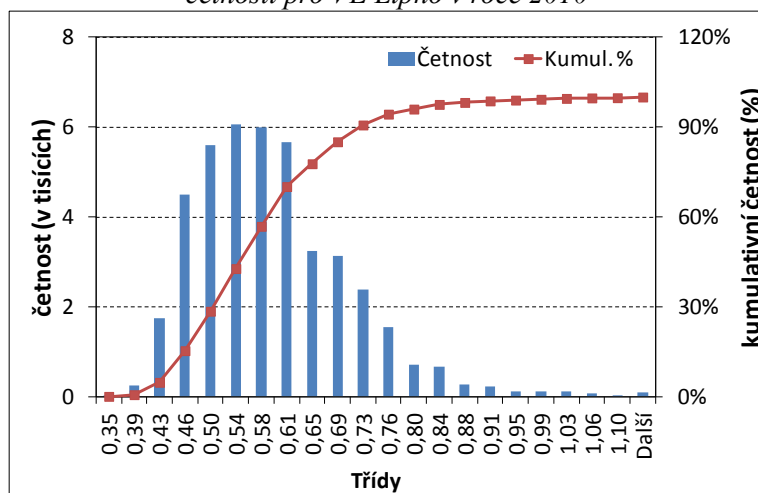
Obr. P 14 Histogram efektivních hodnot primárního napětí  $U_{23}$  včetně kumulativní četnosti pro VE Lipno v roce 2010



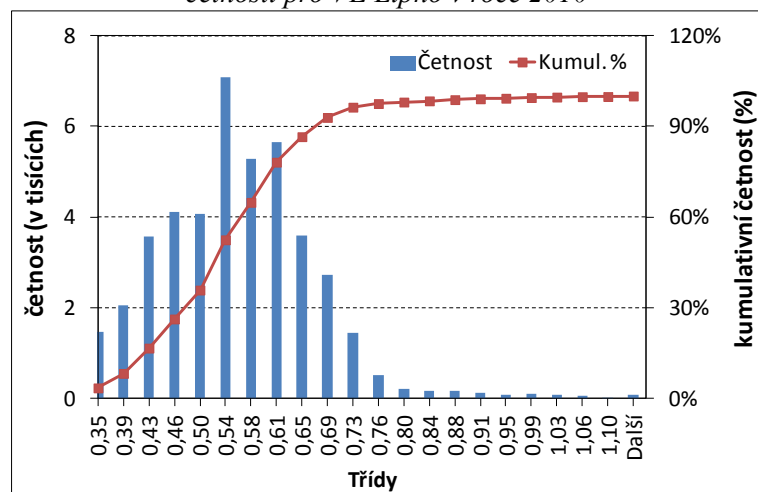
Obr. P 15 Histogram efektivních hodnot primárního napětí  $U_{31}$  včetně kumulativní četnosti pro VE Lipno v roce 2010



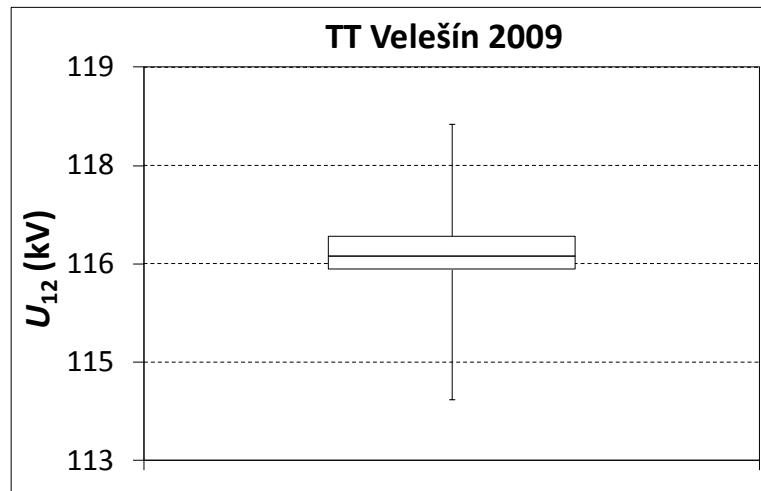
Obr. P 16 Histogram hodnot koeficientu celk. zkreslení  $THD_{U12}$  primárního napětí včetně kumulativní četnosti pro VE Lipno v roce 2010



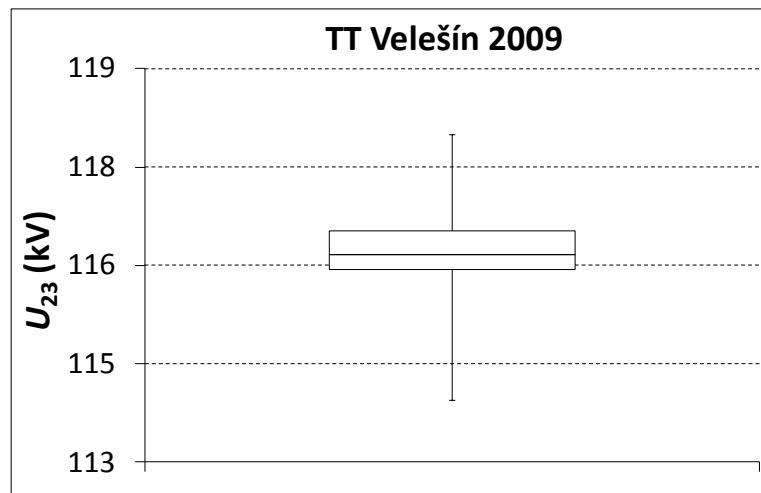
Obr. P 17 Histogram hodnot koeficientu celk. zkreslení  $THD_{U23}$  primárního napětí včetně kumulativní četnosti pro VE Lipno v roce 2010



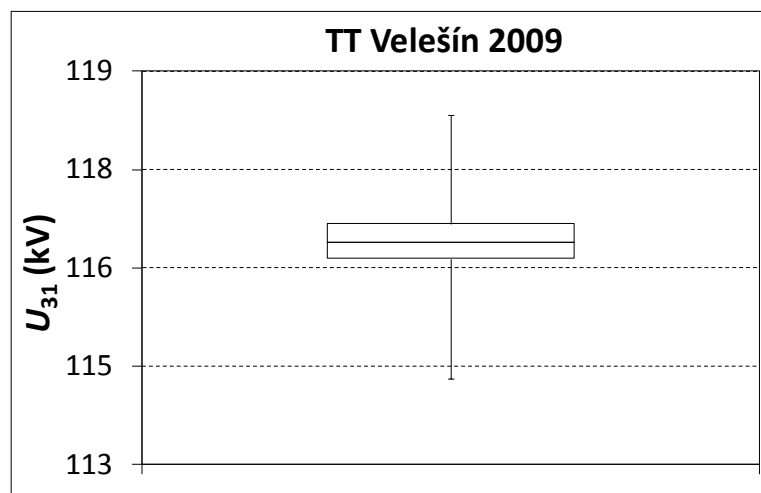
Obr. P 18 Histogram hodnot koeficientu celk. zkreslení  $THD_{U31}$  primárního napětí včetně kumulativní četnosti pro VE Lipno v roce 2010



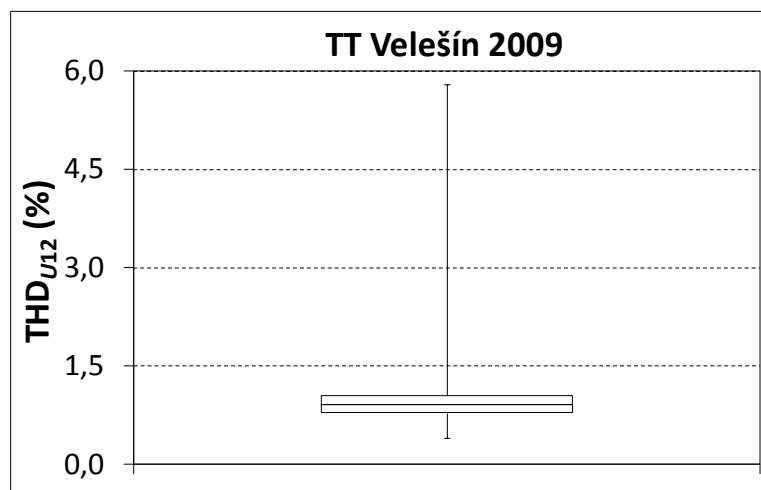
Obr. P 19 Krabicový graf efektivních hodnot primárního napětí  $U_{12}$  včetně pro TT Velešín v roce 2009



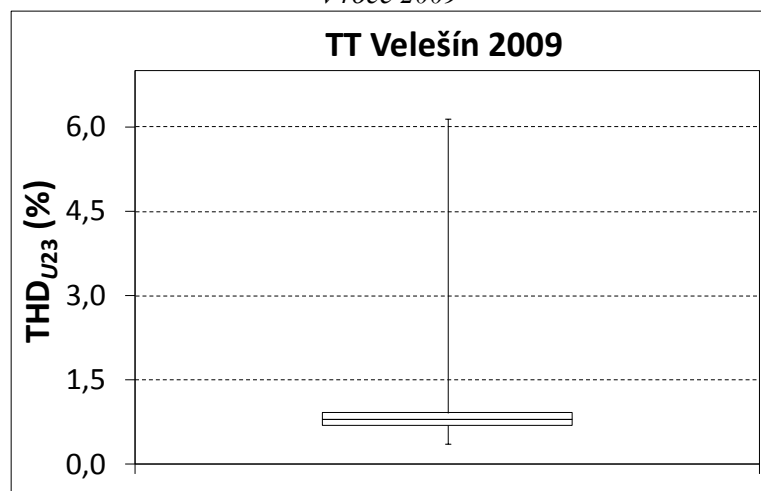
Obr. P 20 Krabicový graf efektivních hodnot primárního napětí  $U_{23}$  včetně pro TT Velešín v roce 2009



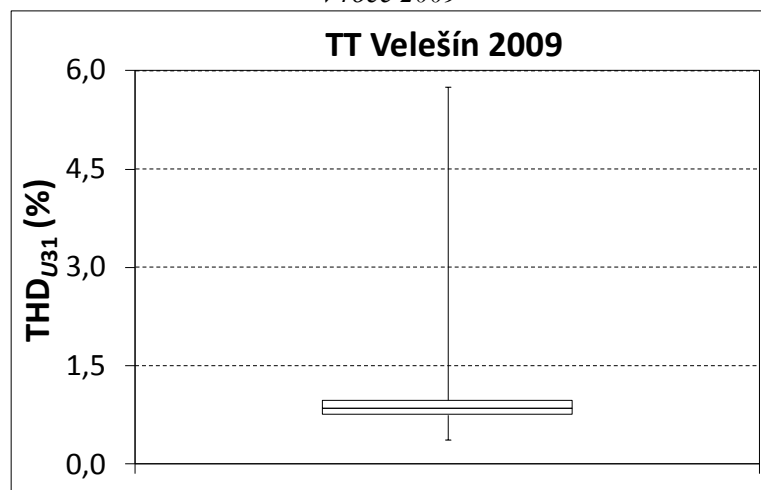
Obr. P 21 Krabicový graf efektivních hodnot primárního napětí  $U_{31}$  včetně pro TT Velešín v roce 2009



Obr. P 22 Krabicový graf hodnot koeficientu celk. zkreslení  $THD_{U12}$  primárního napětí pro TT Velešín v roce 2009

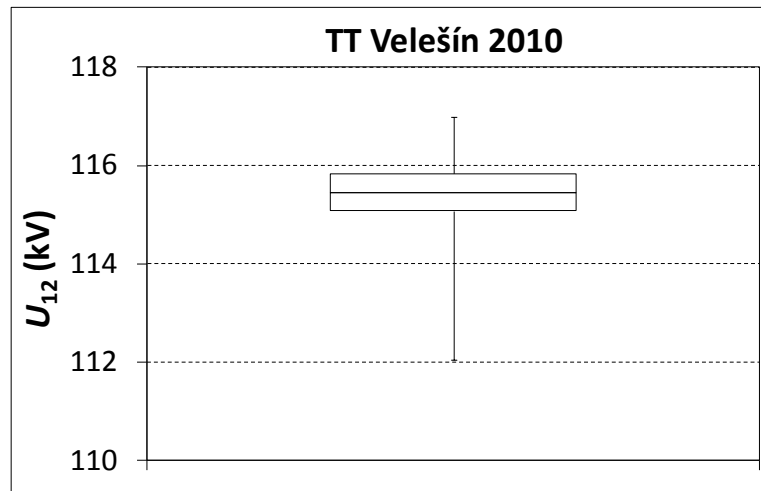


Obr. P 23 Krabicový graf hodnot koeficientu celk. zkreslení  $THD_{U23}$  primárního napětí pro TT Velešín v roce 2009

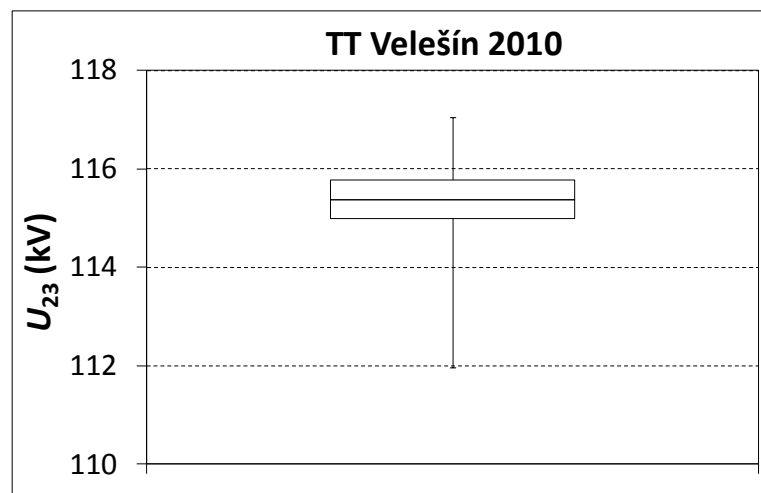


Obr. P 24 Krabicový graf hodnot koeficientu celk. zkreslení  $THD_{U31}$  primárního napětí pro TT Velešín v roce 2009

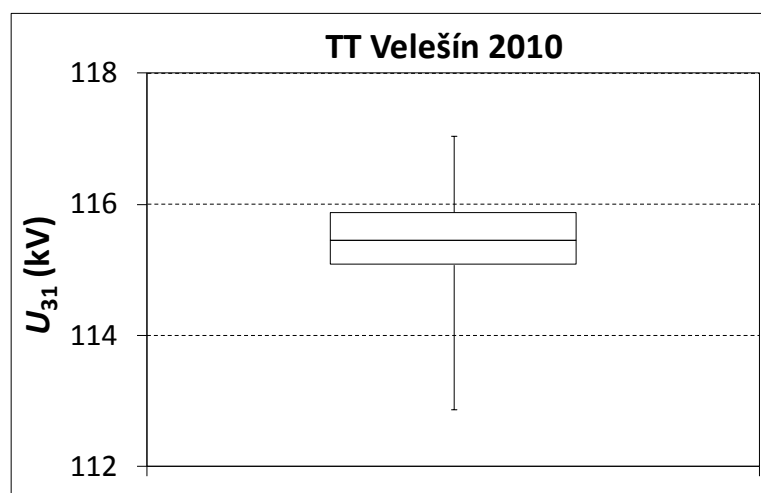




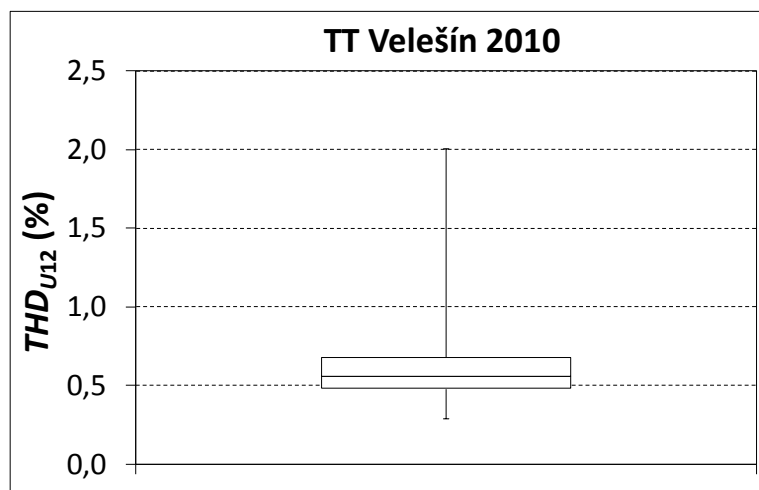
Obr. P 25 Krabicový graf efektivních hodnot primárního napětí  $U_{12}$  včetně pro TT Velešín v roce 2010



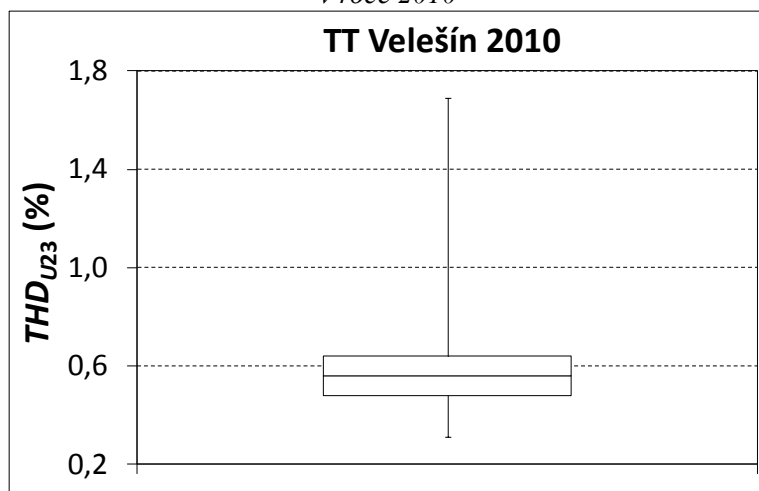
Obr. P 26 Krabicový graf efektivních hodnot primárního napětí  $U_{23}$  včetně pro TT Velešín v roce 2010



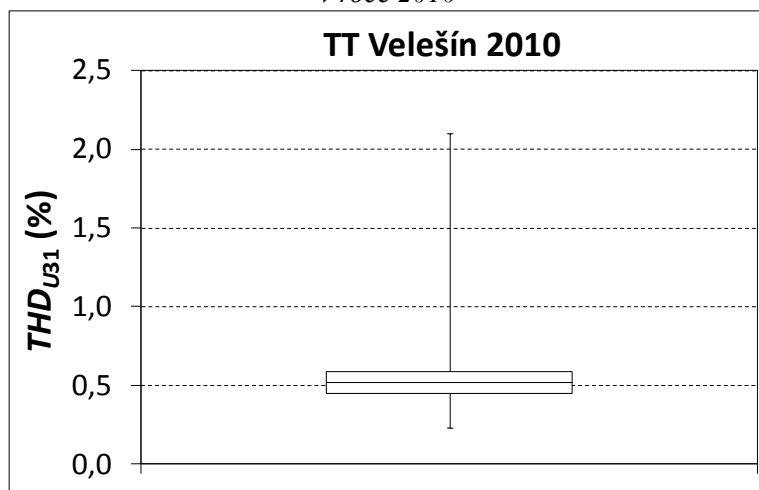
Obr. P 27 Krabicový graf efektivních hodnot primárního napětí  $U_{31}$  včetně pro TT Velešín v roce 2010



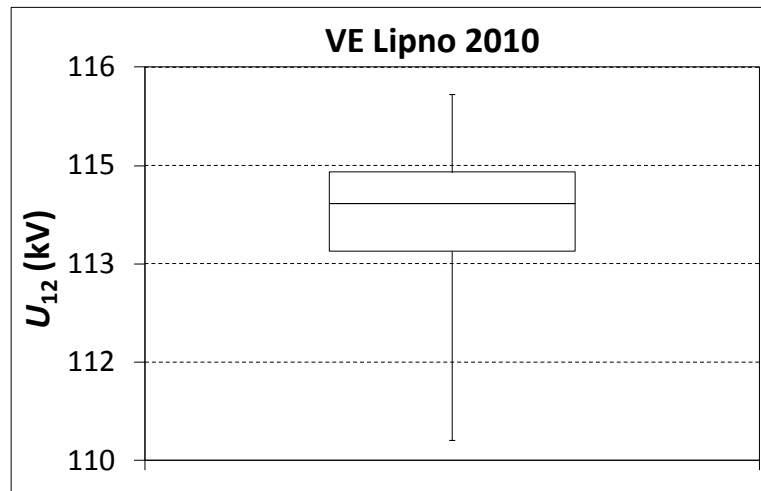
Obr. P 28 Krabicový graf hodnot koeficientu celk. zkreslení  $THD_{U12}$  primárního napětí pro TT Velešín v roce 2010



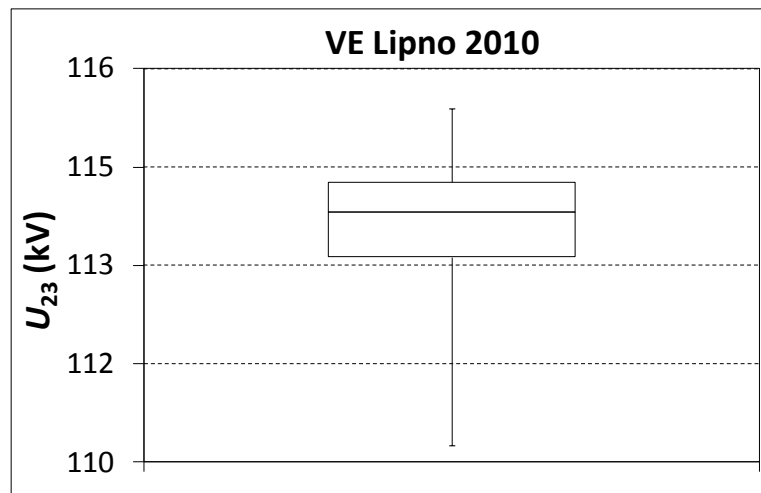
Obr. P 29 Krabicový graf hodnot koeficientu celk. zkreslení  $THD_{U23}$  primárního napětí pro TT Velešín v roce 2010



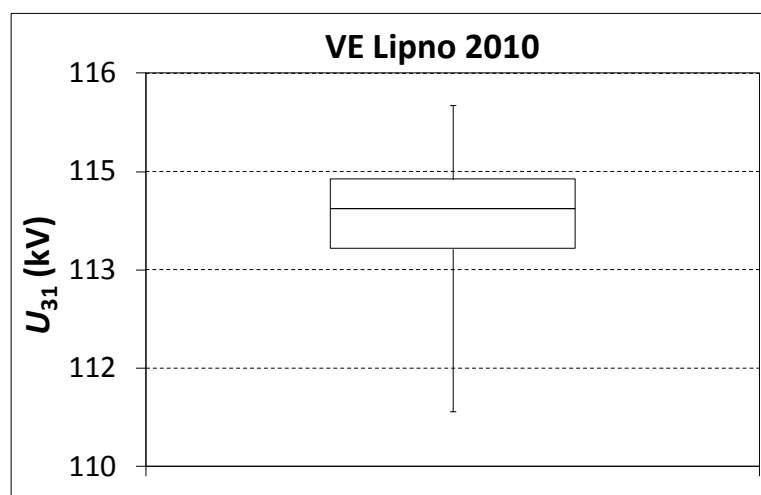
Obr. P 30 Krabicový graf hodnot koeficientu celk. zkreslení  $THD_{U31}$  primárního napětí pro TT Velešín v roce 2010



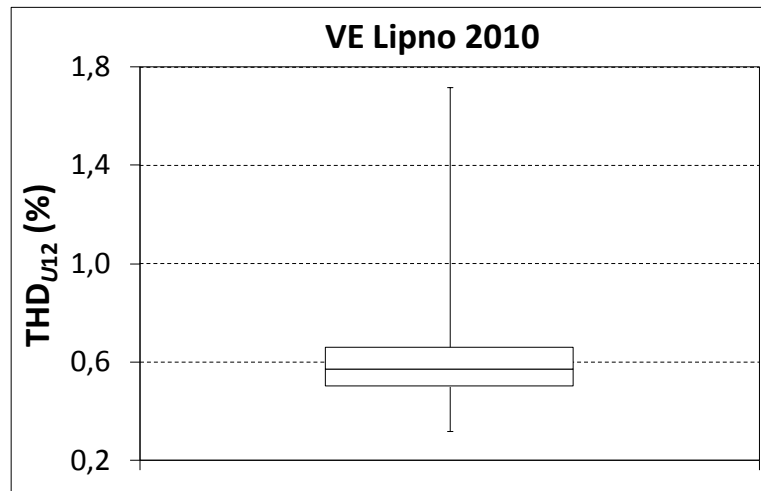
Obr. P 31 Krabicový graf efektivních hodnot primárního napětí  $U_{12}$  včetně pro VE Lipno v roce 2010



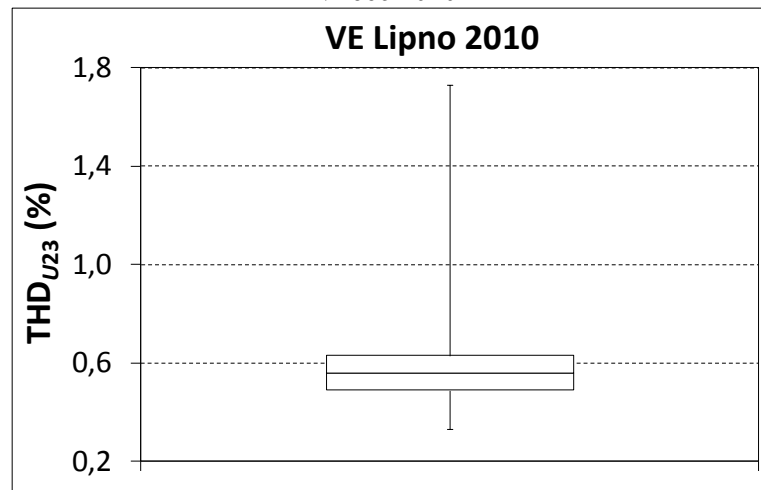
Obr. P 32 Krabicový graf efektivních hodnot primárního napětí  $U_{23}$  včetně pro VE Lipno v roce 2010



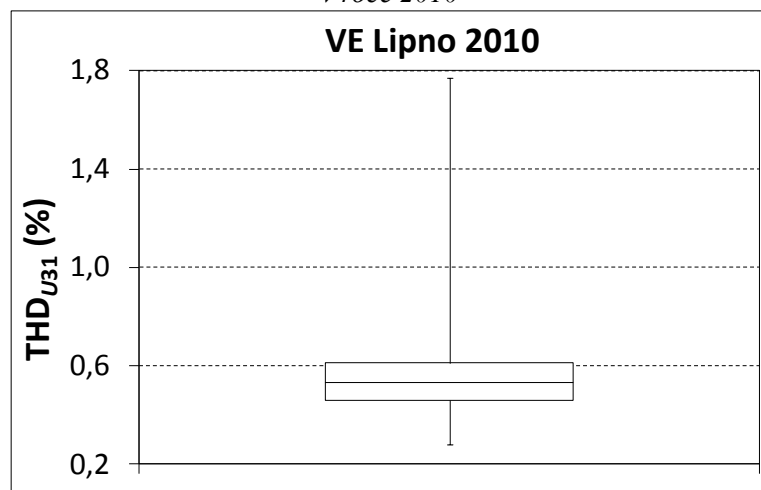
Obr. P 33 Krabicový graf efektivních hodnot primárního napětí  $U_{31}$  včetně pro VE Lipno v roce 2010



Obr. P 34 Krabicový graf hodnot koeficientu celk. zkreslení  $THD_{U12}$  primárního napětí pro VE Lipno v roce 2010



Obr. P 35 Krabicový graf hodnot koeficientu celk. zkreslení  $THD_{U23}$  primárního napětí pro VE Lipno v roce 2010



Obr. P 36 Krabicový graf hodnot koeficientu celk. zkreslení  $THD_{U31}$  primárního napětí pro VE Lipno v roce 2010

Tab. P 1: Zdrojová data histogramu na Obr. 6.1

Třídy	$U_{12}$		$U_{23}$		$U_{31}$	
	četnost	Kumulativní četnost (%)	četnost	Kumulativní četnost (%)	četnost	Kumulativní četnost (%)
112200	2	0,00%	7	0,01%	0	0,00%
112430	23	0,04%	76	0,14%	0	0,00%
112660	60	0,14%	150	0,39%	0	0,00%
112890	284	0,63%	326	0,95%	2	0,00%
113120	501	1,47%	706	2,14%	179	0,31%
113350	566	2,43%	251	2,57%	696	1,49%
113580	238	2,84%	423	3,29%	559	2,43%
113810	607	3,86%	1141	5,22%	223	2,81%
114040	1858	7,01%	2155	8,87%	718	4,03%
114270	2436	11,14%	1942	12,16%	2033	7,47%
114500	2163	14,80%	2022	15,59%	2222	11,24%
114730	1354	17,10%	1823	18,67%	2123	14,83%
114960	2497	21,33%	3041	23,83%	2099	18,39%
115190	6238	31,90%	7302	36,20%	8076	32,07%
115420	9273	47,61%	10382	53,79%	9411	48,02%
115650	8437	61,91%	7538	66,56%	8141	61,81%
115880	9441	77,90%	7364	79,04%	7893	75,19%
116110	5908	87,91%	4914	87,36%	6702	86,54%
116340	3387	93,65%	3456	93,22%	3659	92,74%
116570	1683	96,50%	1950	96,52%	2424	96,85%
116800	1696	99,37%	1668	99,35%	1587	99,54%
Další	369	100,00%	384	100,00%	274	100,00%

Tab. P 2: Zdrojová data histogramu na Obr. 6.3

Třídy	$THD_{U12}$		$THD_{U23}$		$THD_{U31}$	
	četnost	Kumulativní četnost (%)	četnost	Kumulativní četnost (%)	četnost	Kumulativní četnost (%)
112200	2	0,00%	7	0,01%	0	0,00%
112430	23	0,04%	76	0,14%	0	0,00%
112660	60	0,14%	150	0,39%	0	0,00%
112890	284	0,63%	326	0,95%	2	0,00%
113120	501	1,47%	706	2,14%	179	0,31%
113350	566	2,43%	251	2,57%	696	1,49%
113580	238	2,84%	423	3,29%	559	2,43%
113810	607	3,86%	1141	5,22%	223	2,81%
114040	1858	7,01%	2155	8,87%	718	4,03%
114270	2436	11,14%	1942	12,16%	2033	7,47%
114500	2163	14,80%	2022	15,59%	2222	11,24%
114730	1354	17,10%	1823	18,67%	2123	14,83%
114960	2497	21,33%	3041	23,83%	2099	18,39%
115190	6238	31,90%	7302	36,20%	8076	32,07%
115420	9273	47,61%	10382	53,79%	9411	48,02%
115650	8437	61,91%	7538	66,56%	8141	61,81%
115880	9441	77,90%	7364	79,04%	7893	75,19%
116110	5908	87,91%	4914	87,36%	6702	86,54%
116340	3387	93,65%	3456	93,22%	3659	92,74%
116570	1683	96,50%	1950	96,52%	2424	96,85%
116800	1696	99,37%	1668	99,35%	1587	99,54%
Další	369	100,00%	384	100,00%	274	100,00%

Tab. P 3: Zdrojová data  
histogramu na Obr. 6.5

Třídy	Us	
	četnost	Kumulativní četnost (%)
26510	382	0,65%
26560	424	1,37%
26610	660	2,48%
26660	508	3,34%
26711	331	3,91%
26761	514	4,78%
26811	1374	7,10%
26862	2534	11,40%
26912	2232	15,18%
26962	1336	17,44%
27012	1455	19,91%
27063	3286	25,48%
27113	8330	39,59%
27163	7654	52,56%
27214	7168	64,70%
27264	8060	78,36%
27314	5542	87,75%
27364	3291	93,32%
27415	1684	96,18%
27465	1393	98,54%
27515	855	99,99%
Další	8	100,00%

Tab. P 4: Zdrojová data histogramu  
na Obr. 6.7

Třídy	THD <sub>Us</sub>	
	četnost	Kumulativní četnost (%)
0,25	0	0,00%
0,3	0	0,00%
0,35	258	0,44%
0,4	2865	5,29%
0,45	6023	15,50%
0,5	9943	32,34%
0,55	9803	48,95%
0,6	9581	65,19%
0,65	8199	79,08%
0,7	5824	88,94%
0,75	2918	93,89%
0,8	1449	96,34%
0,85	718	97,56%
0,9	458	98,34%
0,95	312	98,86%
1	252	99,29%
1,05	153	99,55%
1,1	107	99,73%
1,15	71	99,85%
1,2	37	99,92%
1,25	19	99,95%
Další	31	100,00%

Tab. P 5: Zdrojová data histogramu na Obr. 6.9

Třídy	P <sub>U</sub>	
	četnost	Kumulativní četnost (%)
0,0100	443	0,75%
0,0420	6878	12,40%
0,0740	13548	35,36%
0,1060	14763	60,37%
0,1380	7478	73,04%
0,1700	3657	79,24%
0,2020	2533	83,53%
0,2340	1859	86,68%
0,2660	1591	89,37%
0,2980	1205	91,42%
0,3300	912	92,96%
0,3620	751	94,23%
0,3940	672	95,37%
0,4260	558	96,32%
0,4580	448	97,08%
0,4900	383	97,73%
0,5220	296	98,23%
0,5540	223	98,61%
0,5860	198	98,94%
0,6180	157	99,21%
0,6500	136	99,44%
Další	332	100,00%

Tab. P 6: Zdrojová data histogramu na Obr. 6.11

Třídy	$U_{12}$		$U_{23}$		$U_{31}$	
	četnost	Kumulativní četnost (%)	četnost	Kumulativní četnost (%)	četnost	Kumulativní četnost (%)
110500	10	0,02%	21	0,05%	0	0,00%
110750	232	0,57%	359	0,89%	0	0,00%
111000	498	1,74%	623	2,36%	124	0,29%
111250	658	3,29%	424	3,35%	688	1,91%
111500	184	3,72%	357	4,19%	607	3,34%
111750	942	5,93%	1089	6,75%	243	3,91%
112000	802	7,82%	745	8,50%	1204	6,74%
112250	1235	10,72%	1203	11,33%	842	8,71%
112500	1247	13,65%	1036	13,77%	1066	11,22%
112750	896	15,76%	1232	16,66%	990	13,55%
113000	1866	20,14%	2426	22,36%	1237	16,45%
113250	2646	26,36%	2272	27,70%	2941	23,37%
113500	2554	32,36%	3087	34,96%	2273	28,71%
113750	3895	41,52%	4447	45,41%	3845	37,75%
114000	5888	55,36%	7291	62,55%	7641	55,70%
114250	5974	69,40%	4910	74,09%	5324	68,22%
114500	4539	80,06%	6307	88,91%	5579	81,33%
114750	4571	90,81%	2414	94,58%	4094	90,95%
115000	2039	95,60%	1208	97,42%	2586	97,03%
115250	1149	98,30%	776	99,25%	867	99,07%
115500	663	99,86%	321	100,00%	395	100,00%
Další	60	100,00%	0	100,00%	2	100,00%

Tab. P 7: Zdrojová data histogramu na Obr. 6.13

Třídy	$THD_{U12}$		$THD_{U23}$		$THD_{U31}$	
	četnost	Kumulativní četnost (%)	četnost	Kumulativní četnost (%)	četnost	Kumulativní četnost (%)
0,35	69	0,16%	30	0,07%	1458	3,43%
0,39	584	1,53%	241	0,64%	2041	8,22%
0,43	2628	7,71%	1752	4,75%	3561	16,59%
0,46	4080	17,30%	4498	15,33%	4102	26,23%
0,50	2997	24,34%	5600	28,49%	4068	35,79%
0,54	5587	37,48%	6061	42,73%	7076	52,43%
0,58	6599	52,98%	5997	56,83%	5272	64,82%
0,61	4659	63,93%	5652	70,11%	5657	78,11%
0,65	3473	72,10%	3241	77,73%	3587	86,54%
0,69	4338	82,29%	3121	85,06%	2712	92,92%
0,73	2672	88,57%	2382	90,66%	1445	96,31%
0,76	2222	93,80%	1542	94,29%	509	97,51%
0,80	1029	96,21%	719	95,98%	212	98,01%
0,84	661	97,77%	663	97,53%	166	98,40%
0,88	272	98,41%	280	98,19%	172	98,80%
0,91	157	98,78%	217	98,70%	116	99,07%
0,95	108	99,03%	113	98,97%	83	99,27%
0,99	111	99,29%	119	99,25%	92	99,49%
1,03	93	99,51%	123	99,54%	70	99,65%
1,06	79	99,69%	69	99,70%	56	99,78%
1,10	31	99,77%	30	99,77%	21	99,83%
Další	99	100,00%	98	100,00%	72	100,00%

Tab. P 8: Zdrojová data histogramu na Obr. 6.15

Třidy	$\rho_U$	
	četnost	Kumulativní
0,015	237	0,56%
0,037	1287	3,58%
0,059	3489	11,78%
0,080	6783	27,72%
0,102	8707	48,19%
0,124	7856	66,65%
0,146	4896	78,16%
0,167	2471	83,97%
0,189	1638	87,82%
0,211	1236	90,72%
0,233	941	92,93%
0,254	764	94,73%
0,276	614	96,17%
0,298	424	97,17%
0,320	315	97,91%
0,341	206	98,39%
0,363	200	98,86%
0,385	143	99,20%
0,407	97	99,43%
0,428	71	99,59%
0,450	39	99,69%
Další	134	100,00%

Tab. P 9: Zdrojová data histogramu na Obr. 6.17

Třidy	$U_{12}$		$U_{23}$		$U_{31}$	
	četnost	Kumulativní četnost (%)	četnost	Kumulativní četnost (%)	četnost	Kumulativní četnost (%)
114553	44	0,07%	4	0,01%	13	0,02%
114710	138	0,30%	13	0,03%	33	0,08%
114867	282	0,77%	200	0,36%	77	0,20%
115023	325	1,31%	442	1,10%	221	0,57%
115180	402	1,98%	230	1,48%	362	1,18%
115336	1049	3,73%	617	2,51%	369	1,79%
115493	1218	5,76%	1214	4,53%	808	3,14%
115650	1613	8,45%	1729	7,41%	1183	5,11%
115806	3992	15,09%	3956	14,00%	1542	7,67%
115963	9158	30,35%	8618	28,35%	2984	12,64%
116120	11576	49,62%	11131	46,89%	6340	23,20%
116276	8678	64,08%	7988	60,19%	9269	38,64%
116433	6792	75,39%	6587	71,16%	9666	54,74%
116589	2390	79,37%	3332	76,71%	9124	69,93%
116746	1515	81,89%	1851	79,79%	4954	78,18%
116903	1655	84,65%	1762	82,73%	1982	81,48%
117059	2052	88,06%	1766	85,67%	1915	84,67%
117216	2524	92,27%	1871	88,78%	1777	87,63%
117373	2889	97,08%	3356	94,37%	2157	91,22%
117529	1318	99,27%	2688	98,85%	3012	96,24%
117686	427	99,99%	667	99,96%	1385	98,55%
Další	9	100,00%	24	100,00%	873	100,00%



Tab. P 10: Zdrojová data histogramu na Obr. 6.19

Třídy	THD <sub>U12</sub>		THD <sub>U23</sub>		THD <sub>U31</sub>	
	četnost	Kumulativní četnost (%)	četnost	Kumulativní četnost (%)	četnost	Kumulativní četnost (%)
0,44	3	0,00%	34	0,06%	4	0,01%
0,55	316	0,53%	1804	3,06%	449	0,75%
0,66	3952	7,11%	9390	18,69%	4345	7,99%
0,77	9741	23,33%	15049	43,75%	12301	28,47%
0,88	13563	45,91%	15700	69,88%	17344	57,34%
0,99	12701	67,05%	8494	84,03%	12115	77,51%
1,10	8097	80,53%	4457	91,45%	6822	88,87%
1,21	4121	87,39%	2690	95,92%	3635	94,92%
1,32	2331	91,27%	1324	98,13%	1589	97,57%
1,43	1705	94,11%	368	98,74%	558	98,49%
1,54	1137	96,01%	91	98,89%	178	98,79%
1,65	729	97,22%	20	98,93%	70	98,91%
1,75	479	98,02%	3	98,93%	16	98,93%
1,86	239	98,42%	4	98,94%	3	98,94%
1,97	125	98,62%	1	98,94%	3	98,94%
2,08	74	98,75%	1	98,94%	1	98,95%
2,19	49	98,83%	5	98,95%	0	98,95%
2,30	34	98,88%	1	98,95%	3	98,95%
2,41	24	98,92%	0	98,95%	1	98,95%
2,52	14	98,95%	1	98,95%	4	98,96%
2,63	6	98,96%	3	98,96%	4	98,97%
Další	626	100,00%	626	100,00%	621	100,00%

Tab. P 11: Zdrojová data histogramu na Obr. 6.21

Třídy	Us	
	četnost	Kumulativní četnost (%)
26708	464	0,77%
26747	63	0,88%
26786	163	1,15%
26826	690	2,30%
26865	1871	5,41%
26904	1699	8,24%
26943	1782	11,21%
26982	1350	13,46%
27021	1610	16,14%
27060	4095	22,96%
27099	9761	39,22%
27138	9775	55,50%
27177	7974	68,78%
27216	5009	77,12%
27255	1954	80,37%
27294	1358	82,63%
27333	1809	85,65%
27372	2081	89,11%
27411	3538	95,00%
27450	2155	98,59%
27489	729	99,81%
Další	116	100,00%

Tab. P 12: Zdrojová data histogramu na Obr. 6.23

Třídy	THD <sub>Us</sub>	
	četnost	Kumulativní četnost (%)
0,46	12	0,02%
0,52	163	0,29%
0,58	661	1,39%
0,64	2309	5,24%
0,70	4717	13,09%
0,76	7067	24,86%
0,82	9210	40,20%
0,88	9482	55,99%
0,93	7519	68,51%
0,99	5743	78,08%
1,05	4115	84,93%
1,11	2915	89,79%
1,17	2069	93,23%
1,23	1512	95,75%
1,29	841	97,15%
1,35	511	98,00%
1,41	252	98,42%
1,47	131	98,64%
1,53	80	98,77%
1,59	50	98,86%
1,65	31	98,91%
Další	656	100,00%

Tab. P 13: Zdrojová data histogramu na Obr. 6.25

Třidy	$\rho_U$	
	četnost	Kumulativní
0,001	1	0,00%
0,029	240	0,40%
0,057	1197	2,39%
0,086	4180	9,35%
0,114	8249	23,09%
0,142	11072	41,52%
0,171	10566	59,11%
0,199	9255	74,52%
0,227	6820	85,87%
0,256	3234	91,26%
0,284	1468	93,70%
0,312	857	95,13%
0,341	573	96,08%
0,369	471	96,87%
0,397	380	97,50%
0,426	347	98,08%
0,454	281	98,54%
27372	2081	89,11%
27411	3538	95,00%
27450	2155	98,59%
27489	729	99,81%
Další	116	100,00%